



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Jani Sorasalmi

Temperierung-menetelmä ja sen soveltaminen massiivirakenteisten seinien kosteusteknisissä korjauksissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 16.10.2017

Valvoja: Professori Xiaoshu Lu-Tervola

Ohjaaja: DI Jukka Huttunen

Tekijä Jani Sorasalmi

Työn nimi Temperierung-menetelmä ja sen soveltaminen massiivirakenteisten seinien kosteusteknisissä korjauksissa

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma

Pää-/sivuaine Rakennusmateriaalit ja rakennus-
fysiikka / Rakennetekniikka

Koodi IA3017

Työn valvoja Xiaoshu Lu-Tervola

Työn ohjaaja(t) Jukka Huttunen

Päivämäärä 16.10.2017

Sivumäärä 92+9

Kieli Suomi

Temperierung on Saksassa 1980-luvulla kehitetty menetelmä, jossa seinärakenteita ja sitä kautta huonetiloja lämmitetään rakenteen sisälle asennettujen lämmitysputkien välityksellä. Menetelmän on todettu ehkäisevän tehokkaasti kosteusongelmia sekä stabi-loivan sisäilmastoa. Vaikka temperierung-menetelmää on Saksassa käytetty laajalti, on se Suomessa jäänyt suhteellisen tuntemattomaksi siitäkin huolimatta, että kosteus- ja homeongelmat ovat huomattavan suuri haaste suomalaisessa rakentamisessa. Kustan-nustehokkaille kosteusongelmien korjausmenetelmille on siis tarvetta. Tämän työn tar-koituksena olikin tutkia temperierung-menetelmän soveltuvuutta kosteusongelmaisten rakennusten korjausmenetelmäksi Suomen ilmasto-olosuhteissa.

Työtä varten suoritettiin kattava kansainvälisiä ja erityisesti saksalaisia tutkimuksia kä-sittelevä kirjallisuuskatsaus. Suomen ilmasto-olosuhteissa käytettävän temperierung-menetelmän rakennusfysikaalista toimintaa tutkittiin WUFI®-ohjelmistoilla tehtyjen mallinnusten avulla. Menetelmän kokeellinen asennus tehtiin Länsi-Suomessa sijaitse-vaan luonnonkiviverhoiltuun massiivitiiliseinään. Seinän sisäistä kosteus- ja lämpötek-nistä toimintaa seurattiin useiden tallentavien mittauslaitteiden avulla kesän 2017 ajan. Tuloksia vertailtiin tietokoneella tehtyihin mallinnuksiin.

Työssä päädyttiin seuraaviin tuloksiin: 1) Lämmitysputkilla lämmitetyn rakenteen ra-kennusfysikaalinen mallintaminen on lukuisista siihen liittyvistä fysikaalisista ilmiöistä johtuen haastavaa, eikä kaupallinen mallinnusohjelma kykene aina riittävän tarkkoihin simuloointeihin. 2) Temperierung on potentiaalinen vaihtoehto Suomessa käytettävien kosteusongelmien korjausmenetelmien rinnalle. Menetelmä osoittautui soveltuvaksi erityisesti massiivisten rakenteiden, kellarin seinien, ikkunoiden ympärysten ja muiden kylmäsiltojen kosteusteknisen toiminnan parantamiseen. 3) Menetelmää voidaan käyt-tää myös rakenteiden väliaikaiseen kuivattamiseen tai mukavuuslämmitykseen.

Temperierung-menetelmää käytettäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota lähtötietoi-hin perehtymiseen sekä järjestelmän suunnitteluun, sillä erilaiset kohteet voivat vaatia hyvinkin erilaisia menetelmän variaatioita. Tehdystä työstä ja saaduista tuloksista huo-limatta jäi aiheesta vielä avoimia kysymyksiä koskien muun muassa energiankulutusta sekä suolojen käyttäytymistä. Myös menetelmän toiminta talviolosuhteissa jäi vielä mallinnusten tulosten varaan. Koekohteen mittauksia jatketaan kuitenkin vielä talven yli, joten tulevaisuudessa tietoa tulee olemaan enemmän saatavilla.

Avainsanat temperierung, tempering, seinälämmitys, kohdennettu seinälämmitys, ra-kenteiden lämmittäminen, korjausrakentaminen, rakennusfysiikka, kosteus, lämpö



Author Jani Sorasalmi

Title of thesis Tempering-method and its applications in renovation of moisture problems in massive walls

Degree programme Structural Engineering and Building Technology

Major/minor Building Materials and Physics / Structural Engineering

Code IA3017

Thesis supervisor Xiaoshu Lu-Tervola

Thesis advisor(s) Jukka Huttunen

Date 16.10.2017

Number of pages 92+9

Language Finnish

Tempering (Temperierung in German) is a wall-based heating method developed in Germany in the 1980s. The idea is to continuously heat the building walls through heating pipes installed inside the walls. The method has been proven to be effective in controlling moisture and stabilizing room climate. Although tempering has been widely used in Germany, it is largely unexplored in Finland, despite the fact that moisture and mould are one of the biggest challenges for the building industry in Finland. Therefore, the purpose of this thesis was to investigate the possibility of applying tempering as a repair technique for moisture problems in buildings under Finnish weather conditions.

First a comprehensive review of mainly Central European and especially German literature was conducted. Then utilizing WUFI® software, a hygrothermal model was developed to thoroughly investigate the thermal and moisture behaviour of a tempered building in the Finnish climate. An experimental installation was also executed in a solid natural stone façade in Western Finland during summer 2017. The installation was monitored by several data loggers recording heat and moisture behaviour inside the wall and the results were compared to computational modelling.

This study found that 1) Modeling heat and moisture transfer in tempered buildings is complicated by the many complex physical processes involved and in some cases, commercial software might be inadequate for simulating accurately hygrothermal behaviour; 2) The tempering-method and its applications are potential alternatives for repairing moisture problems in Finland and the method proved to be suitable especially for improving the moisture behaviour of solid structures, basement walls, window surroundings and other thermal bridges; 3) Tempering can also be used as a temporary drying method or as a comfort heating system.

Anyhow, the use of this method requires careful analysis of the initial data and a precise design of the heating system. Different structures might require very different kinds of tempering-methods. This thesis appears to represent the first contribution to studying tempering and its feasibility in Finnish climate scenarios. Despite significant efforts and results, there are still unsolved questions concerning this method, especially regarding the controversial findings of energy consumption and salt behaviour. Furthermore, the operation of the tempering system in the Finnish winter is still based on computational modelling. However, the tempering system will continue to be measured over the winter and thus more information on these issues will be provided in the future.

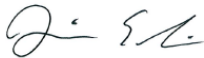
Keywords temperierung, tempering, wall heating, renovation, building physics, moisture, heat, U-value

Alkusanat

Diplomityön aihetta ehdotti ja ohjaajana toimi IdeaStructura Oy:n Jukka Huttunen. Aalto-yliopiston puolesta valvojana toimi Xiaoshu Lu-Tervola. Lisäksi Jyrki Jalli, Tiina Palviainen, Jenni Malinen sekä monet muut työkaverit auttoivat käytännön asioiden ja työn sisällön ideoinnin kanssa. Valmiin työn oikolukemisen suoritti Rasmus Björkell. Suuri kiitos erityisesti edellä mainituille sekä kaikille muillekin työn tekemisessä ja tiedon keräämisessä avustaneille uusille tuttavuuksille! Diplomityön rahoituksesta kiitos menee IdeaStructura Oy:lle.

*Tämän lisäksi haluaisin kiittää myös perhettä ja kavereita, jotka ovat seuranneet, tuke-
neet ja neuvoneet melkein 30 vuotta jatkunutta koheltamista harrastusten, opiskelujen ja
kohta myös oikean työelämän parissa.*

Espoo 16.10.2017



Jani Sorasalmi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Termit ja määritelmät	8
1 Johdanto	10
2 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät	11
3 Seinärakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta	12
3.1 Rakenteiden lämpötekkinen toiminta	12
3.1.1 Yleistä	12
3.1.2 Konduktio	12
3.1.3 Konvektio	12
3.1.4 Säteily	13
3.1.5 Lämmönjohtavuus	13
3.1.6 Pintavastus	13
3.1.7 Operatiivinen lämpötila	14
3.1.8 Lämpöviihtyvyys	14
3.2 Rakenteiden kosteustekkinen toiminta	15
3.2.1 Yleistä	15
3.2.2 Diffuusio	15
3.2.3 Vesihöyryn konvektio	16
3.2.4 Kondensoituminen	16
3.2.5 Kapillaarisuus	16
3.2.6 Hygroskooppisuus	17
3.2.7 Painovoimainen siirtyminen	18
3.2.8 Kosteuslähteet	19
3.3 Materiaalien lämpö- ja kosteustekkinen toiminta	20
3.3.1 Yleistä	20
3.3.2 Lämmöneristeet	21
3.3.3 Runko- ja pintamateriaalit	22
3.4 Rakennusfysikaalinen mallintaminen	24
3.5 Kosteuden aiheuttamat vauriot rakenteissa	25
3.5.1 Mikrobikasvustot	26
3.5.2 Suolat	26
3.5.3 Pakkasrapautuminen	27
3.6 Rakenteiden kuivuminen	27
4 Temperierung	29
4.1 Johdanto / Historia	29
4.2 Menetelmän kuvaus	30
4.3 Fysikaaliset perusteet	32
4.3.1 Upotettu putki	32
4.3.2 Seinän pinnalla oleva putki	33
4.3.3 Kotelon sisällä oleva putki	34
4.4 Käyttötavat	34
4.4.1 Yleistä	34
4.4.2 Kosteudenhallinta	35
4.4.3 Lämmitysjärjestelmä	38

4.4.4	Sisäilmasto	41
4.5	Käyttöohjeistus	45
4.5.1	Yleistä	45
4.5.2	Vaatimukset	45
4.5.3	Mitoitus ja suunnittelu	46
4.5.4	Materiaalivalinnat	50
4.5.5	Asennus	51
4.5.6	Käyttö	54
4.5.7	Seuranta ja tiedon kerääminen	55
4.6	Taloudellisuus ja ekologisuus	55
4.6.1	Yleistä	55
4.6.2	Energianlähde	56
4.6.3	Ristiriitaisia näkemyksiä energiansäästöstä	56
4.6.4	Energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä	57
4.7	Esimerkkikohteita	59
4.7.1	Suomenlinnan kosteusvauriokorjaukset	59
4.7.2	Salstan linnan energiankulutusvertailu	62
4.7.3	Benediktbeuernin luostarin energiankulutusvertailu	64
4.8	Mahdollisia käyttökohteita	65
5	Mallinnukset	67
5.1	Lähtötiedot	67
5.2	Tiilirakenteinen maanvarainen väliseinä	70
5.3	Maanvastainen betonisandwich-ulkoseinä	74
6	Koekohde	78
6.1	Lähtötiedot	78
6.2	Mallinnus	79
6.3	Asennus ja mittaus	81
6.4	Tutkimustulokset	82
7	Pohdinta	85
8	Johtopäätökset	86
	Lähdeluettelo	89
	Liiteluettelo	92
	Liitteet	

Merkinnät

A_w	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$	Kapillariteettikerroin
B_w	$[\text{m}/\text{s}^{0,5}]$	Veden tunkeutumiskerroin
h	$[\text{m}]$	Kapillaarinen nousukorkeus
P	$[\text{W}]$	Teho
R	$[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$	Lämmönvastus
r	$[\text{m}]$	Kapillaariputken paksuus
RH	$[\%]$	Suhteellinen kosteus
S_d	$[\text{m}]$	Suhteellinen diffuusiovastus
T	$[\text{°C}]$	Lämpötila
w	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Vesipitoisuus
Z_p	$[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}]$	Vesihöyrynvastus
λ	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Lämmönjohtavuus
λ_U	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo
μ	$[-]$	Diffuusiovastuskerroin
ρ	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Tiheys
δ_p	$[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$	Vesihöyrynläpäisevyys
δ_v	$[\text{m}^2/\text{s}]$	Vesihöyrynläpäisevyys

Termit ja määritelmät

Adiabaattinen

Adiabaattisella reunaehdolla tarkoitetaan rakennusfysikaalisissa mallinuksissa sellaista rajapintaa, jonka läpi ei kulkeudu lämpö- eikä kosteusvirtaa.

Coandă-ilmiö

Coandă-ilmiöllä tarkoitetaan virtauksen taipumusta kääntyä kohti läheistä pintaa ja virrata sen mukaisesti.

Diffuusiovastuskerroin

Diffuusiovastuskertoimella (μ) kuvataan ilman ja huokoisen aineen vesihöyrynläpäisevyyksien suhdetta.

Emissiivisyys

Emissiivisyydellä tarkoitetaan materiaalin pinnan säteilytehon ja teoreettisen täysin mustan kappaleen säteilytehon suhdetta. Arvo ilmoitetaan välillä 0-1.

Huokoisuus

Huokoisuus kuvaa materiaalin huokosten yhteenlaskettua tilavuutta suhteessa koko materiaalin tilavuuteen.

Hygroskooppinen tasapainokosteus

Hygroskooppisella tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteuspitoisuutta, johon materiaali asettuu vallitsevan ympäristön suhteellisessa kosteuspitoisuudessa.

Hypocaust

Antiikin Roomassa ja Kreikassa käytössä ollut lämmitysjärjestelmä, jossa lämmitettyä ilmaa johdettiin rakennuksen lattioiden alla ja rakenteiden sisällä oleviin onkaloihin.

Hystereesi

Hystereesillä tarkoitetaan ilmiötä, joka hidastaa tapahtuvia muutoksia. Esimerkiksi hygroskooppisissa tasapainokäyrissä materiaalin tasapainokosteus tietyssä suhteellisessa kosteudessa riippuu siitä, onko se kastumassa vai kuivumassa.

Kapillaarinen kosteustasapaino

Kapillaarinen kosteustasapaino tarkoittaa materiaalin sitä kosteuspitoisuutta, johon se asettuu, kun kapillaarista vettä nostava huokosalipaine ja alaspäin vetävä painovoima asettuvat tasapainoon.

Kapillariteettikerroin

Kapillariteettikerroin eli veden imeytymiskerroin A_w kuvaa kapillaarisesti imeytyvän veden määrää, kun materiaali on kosketuksissa vapaaseen vedenpintaan. Kapillariteettikerroin riippuu materiaalin ominaisuuksien lisäksi kappaleen kosteuspitoisuudesta.

Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuudella (λ) tarkoitetaan aineen kykyä johtaa lämpöenergiaa lävitseen. Lämmönjohtavuus ilmoitetaan lämpövirtana ainekerroksen paksuutta ja vastakkaisten pintojen välistä lämpötilaeroa kohti.

Lämmönläpäisykerroin

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo ilmoittaa rakennusosan läpäisevän lämpövirran tiheyden tietyssä lämpötilaerossa. Mitä pienempi U-arvo rakenteella on, sitä paremmin se eristää lämpöä.

Lämmönvastus

Lämmönvastus (R) kuvaa tietyn paksuisen ainekerroksen kykyä vastustaa sen läpi kulkeutuvaa lämpöenergiaa.

Suhteellinen diffuusiovastus

Suhteellinen diffuusiovastus eli S_d -arvo kuvaa tietynpaksuisen materiaalikerroksen vesihöyrynvastustuskkyä. Metreinä ilmoitettu arvo kuvaa sitä, kuinka suurella ilmakerroksella vastaava diffuusiovastus saataisiin aikaan.

Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys ilmoittaa pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen ainekerroksen läpi kulkevan vesihöyryn määrän, kun vesihöyryn osapaine-ero ainekerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen. Käytetyistä yksiköistä riippuen vesihöyrynläpäisevyyden merkintänä käytetään joko δ_p tai δ_v .

1 Johdanto

Tässä diplomityössä esitellään Suomessa kohtuullisen vähälle huomiolle jäänyt rakenteiden lämmitys- ja korjausmenetelmä temperierung. Tämä Saksassa kehitetty menetelmä on ollut käytössä ja tutkimusten kohteena Keski-Euroopassa jo yli 30 vuotta. Suomalaisessa kirjallisuudessa menetelmästä löytyy kuitenkin vain muutamia mainintoja ja yhden kappaleen pituinen esittely Tiina Palviaisen maanvastaisten rakenteiden korjausmenetelmiä koskevasta diplomityöstä (1).

Tämän tutkimuksen pääasiallisena tarkoituksena on paneutua syvemmin temperierungmenetelmän käyttöön kosteusteknisenä korjausmenetelmänä ja luoda suomenkielinen yleiskatsaus aiheesta. Tavoitteena työn tekemisessä on ymmärtää kyseisen menetelmän toimintaperiaatteet sekä kirjallisuuden että omakohtaisen tutkimuksen avulla. Näin karttuneen tiedon perusteella voidaan myös luoda ohjeistus menetelmän suunnittelua, asennusta ja käyttöä varten.

Työn rajaus tehtiin siten, että tutkimukset kohdistuivat pääasiassa menetelmän käyttöön korjaus- ja kosteudenhallintajärjestelmänä. Näiden lisäksi myös menetelmän käyttö lämmitys- ja sisäilmastonhallintajärjestelmänä käytiin läpi. Tämä siksi, että temperierung-järjestelmän käyttö lämmittää rakennusta joka tapauksessa ja vaikuttaa siten sisäilmastoon aina ollessaan käytössä. Temperierung-menetelmän energiatehokkuus on monimutkaisuudessaan oman tutkimuksensa arvoinen, joten se rajataan tämän työn mallinnusten ja koemittausten ulkopuolelle.

Vaikka temperierung-menetelmää on siis käytetty Saksassa yleisesti lämmitys- ja ilmastohallintamenetelmänä, päätettiin tämän työn pääpaino asettaa sen tutkimiseen korjausmenetelmänä. Tämä siksi, että on mielestäni järkevämpää tuoda kyseinen menetelmä Suomeen ensisijaisesti korjausmenetelmänä, jonka toimintavarmuudesta ei juurikaan ole epäselvyyksiä olemassa olevissa tutkimuksissa. Vaikka menetelmän energiatehokkuudesta löytyy paljon ristiriitaista tietoa, on tämän todettu olevan toissijaista korjausmenetelmänä ilmenevien positiivisten vaikutusten rinnalla. Jos menetelmä todetaan Suomen olosuhteissa toimivaksi korjausmenetelmäksi ja sen asema vakiintuu, on luonnollista tutkia menetelmää tarkemmin myös lämmitysjärjestelmänä. Jos sen sijaan menetelmää tutkittaisiin Suomessa ensin lämmitysjärjestelmänä, olisi mahdollista, että energiatehokkuuden kannalta mahdolliset negatiiviset tulokset vähentäisivät temperierungin houkuttelevuutta myös korjausmenetelmänä.

2 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

Koska tutkittavaa menetelmää on kehitetty ja tutkittu Saksassa jo yli 30 vuotta, pohjautuu tämän työn teoriaosuus enimmäkseen saksalaisiin ja muihin keskieurooppalaisiin tutkimuksiin. Erityisesti menetelmän kehittäjä Henning Großesmidt on julkaissut runsaasti kirjallisuutta aiheeseen liittyen. Maantieteellisesti lähin temperierung-menetelmää käsittelevä tutkimus löytyi Ruotsista, missä menetelmää on kokeiltu Uppsalan lähistöllä sijaitsevassa Salstan linnassa. Rakennusfysiikan teoriaa käsittelevässä osassa on perehdytty myös suomalaiseen kirjallisuuteen.

Tätä diplomityötä varten suoritettiin myös runsaasti WUFI® -ohjelmistoilla suoritettuja laskelmia ja mallinnuksia, joista olennaisimmat on esitelty kappaleessa 5. Laskelmien tueksi menetelmää testattiin myös käytännössä Länsi-Suomessa sijaitsevassa kohteessa. Kappaleessa 6 esitellään koekohteen mittaustulokset ja niiden vertailu samasta kohteesta tehtyjen mallinnusten tuloksiin.

3 Seinärakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta

Rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta on tullut yhä merkittävämpää ilmastomuutoksen sekä yleisen energiansäästön johdosta. Kiristyvät säädökset pakottavat suunnittelijat kiinnittämään yhä enemmän huomiota rakenteiden lämmöneristävyyteen, mikä on hyvin vahvasti kytköksissä myös rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Tässä kappaleessa on esitetty tämän diplomityön aiheen kannalta olennaisimmat rakennuksen rakennusfysikaaliseen toimintaan vaikuttavat lämpö- ja kosteustekniset ilmiöt sekä työn kannalta olennaisimmat rakennusmateriaalit.

3.1 Rakenteiden lämpötekniinen toiminta

3.1.1 Yleistä

Lämpö on energian muoto, joka on varastoitunut aineeseen sen atomien tai molekyylien värähtelyliikkeeksi. Tämä lämpöenergia pyrkii aina siirtymään lämpimämmästä aineesta kylmempään ja on siksi käytännössä jatkuvasti liikkeessä. Lämmön kolme siirtymistapaa ovat konduktio eli johtuminen, konvektio eli kaasun tai nesteen virtauksen mukana siirtyminen sekä lämpösäteily. Rakennuksissa lämmön siirtymistä tapahtuu samanaikaisesti kaikilla edellä mainituilla tavoilla. Vallitseva lämmön siirtymismuoto on kuitenkin hyvin paikallista ja se riippuu olennaisesti rakennuksen rakenneratkaisuista, siihen käytetyistä materiaaleista sekä käytössä olevasta lämmitysjärjestelmästä. Nämä kaikki vaikuttavat osaltaan myös siihen, millaiseksi rakennuksen käyttäjä kokee tilassa vallitsevat lämpöolosuhteet.

3.1.2 Konduktio

Konduktio eli johtuminen tarkoittaa lämpöenergian eli molekyylien liike-energian virtausta molekyylisestä toiseen ilman, että itse aine vaihtaa paikkaa. Lämpövirta pyrkii aina tasoittamaan vallitsevia lämpötilaeroja virtaamalla lämpimämmästä aineesta kylmempään. Konduktiota tapahtuu niin nesteissä, kaasuissa kuin kiinteässä aineessakin sekä kaikkien näiden välillä.

3.1.3 Konvektio

Vaikka lämpöenergia siirtyy kaasumolekyylien välillä myös johtumalla, on konvektio hallitseva ilma- tai vesimassassa tapahtuva lämpöenergian siirtyminen. Konvektio tarkoittaa siis lämpöenergian siirtymistä kaasu- tai nestemolekyylien virtausten mukana. Rakennuksissa tämä tarkoittaa käytännössä eri lämpötilassa olevien ilmatilojen välisiä virtauksia, jotka kuljettavat lämpöenergiaa mukanaan.

Konvektiovirtaukset voivat olla syntymekanismistaan riippuen joko pakotettuja tai luonnollisia. Luonnollisella konvektiovirtauksella tarkoitetaan molekyylien lämpötilaeroista johtuvien tiheyserojen aikaansaamaa aineen liikettä. Pakotettu konvektio tarkoittaa lämpötilasta riippumattoman ulkopuolisen voiman aiheuttamaa aineen liikettä, josta hyvä esimerkki on rakennuksen ilmanvaihdon aiheuttamat paine-erot. Tuuli puolestaan on ainakin osittain luonnollisen konvektion aiheuttamaa, kun auringon säteilyn välillisesti lämmittämät ilmamassat liikkuvat ilmakehässä. Rakennustekniikan mitta-kaavassa tuuli voidaan kuitenkin luokitella pakotetuksi konvektioksi, sillä sen vaikutus tulee rakennuksen ulkopuolelta riippumatta paikallisista lämpötilaeroista. Rakennuksen

sisäisiä luonnollisia konvektiovirtauksia ovat esimerkiksi lämmityspattereiden aiheuttamat ilmavirtaukset. Käytännössä konvektiovirtaukset ovat siis yleensä sekä luonnollisia että pakotettuja.

3.1.4 Säteily

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä ilman väliainetta. Aine, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen, säteilee lämpöenergiaa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että rakennusten kaikki osat emittoivat jatkuvasti pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Kuumista kappaleista, kuten aurin-gosta peräisin oleva lyhytaaltainen lämpösäteily sisältää pitkäaaltoista säteilyä enemmän energiaa ja näin ollen sen lämmittävä vaikutus on suurempi. Lyhytaaltainen lämpösäteily myös läpäisee lasin pitkäaaltoista tehokkaammin. Tämä tarkoittaa rakennus-tekniikassa sitä, että ikkunat päästävät auringon lämpösäteilyä tehokkaasti sisälle, mutta ehkäisevät sisäpuolisista rakenteista ikkunan läpi ulos suuntautuvaa säteilyä. (2)

Materiaalin emissiivisyydestä riippuu, kuinka paljon siihen osuvasta lämpösäteilystä absorboituu ja kuinka paljon heijastuu pois. Emissiivisyys tarkoittaa materiaalin pinnan säteilytehon ja teoreettisen mustan kappaleen säteilytehon suhdetta, joka ilmoitetaan välillä 0-1. Mitä pienempi on materiaalin emissiivisyys, sitä suurempi osa siihen osuvasta säteilystä heijastuu pois. Emissiivisyys kuvaa absorboitumisen lisäksi myös materiaalin kykyä emittoida säteilyä. Musta kappale siis sekä vastaanottaa että lähettää voimakkaasti lämpösäteilyä.

3.1.5 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus λ [W/(K·m)] kuvaa tasalaatuisen aineen ominaisuutta johtaa lämpöenergiaa sisällään. Materiaalikerroksen lämmönjohtavuuden arvon avulla voidaan siis laskea tietyn paksuisen ja tietyssä lämpötilaerossa olevan materiaalin läpi virtaava lämpöenergia watteina.

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvolla λ_0 tarkoitetaan EN-standardeissa, Suomen rakentamismääräyskokoelmassa tai muulla tavoin tyyppihyväksyttyä rakennusfysikaalisissa laskelmissa käytettävää arvoa. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo ottaa huomioon valmistustekniikasta johtuvat epävarmuudet sekä tavanomaiset lämpötilan, kosteuden ja ikääntymisen aiheuttamat vaikutukset materiaalin lämmönjohtavuuteen. (2)

Rakennusosan materiaalien lämmönjohtavuuksien avulla voidaan laskea materiaalikerrosten lämmönvastukset ja sitä kautta koko rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo. Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuudet vaikuttavat siis rakenteen sisälle muodostuvaan lämpötilajakaumaan sekä materiaalikerroksista muodostuvan rakennusosan lämmöneristävyyteen.

Tämän diplomityön kannalta huomioitavaa on, että aineen lämmönjohtavuus on riippuvainen sen lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta. Lämmönjohtavuus ei siis ole vakio, vaikka tavallisesti rakennesuunnittelussa käytetäänkin vakiintuneita arvoja.

3.1.6 Pintavastus

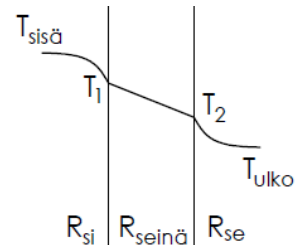
Rakenteen pinnan ja ympäröivän ilmatilan välistä lämmönvastusta kutsutaan sisä- tai ulkopuoliseksi pintavastukseksi riippuen siitä, tarkastellaanko ulkoilmaan vai sisäil-

maan rajautuvaa rakennusosan pintaa. Pintavastus muodostuu rakennusosan pinnalla pysyvän lähes liikkumattoman ilmakerroksen vaikutuksesta. Pintavastuksen johdosta lämmityskaudella lämmittämättömän ulkoseinän pinnan lämpötila on hieman matalampi kuin lämmitetyn sisäilman (Kuva 1).

Tämän diplomityön laskelmissa on käytetty Suomen rakentamismääräyskokoelman (3) määrittämiä seinärakenteiden sekä maanvastaisten rakenteiden pintavastusten arvoja:

Seinän sisäpuolinen pintavastus	$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Seinän ulkopuolinen pintavastus	$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Perusmuurin viereinen maa	$R_{b1} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Perusmaa alapohjan alla	$R_{b2} = 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Maanvastaisten rakenteiden pintavastukset on määritetty salaojittamattomalle hiekalle tai soralle.



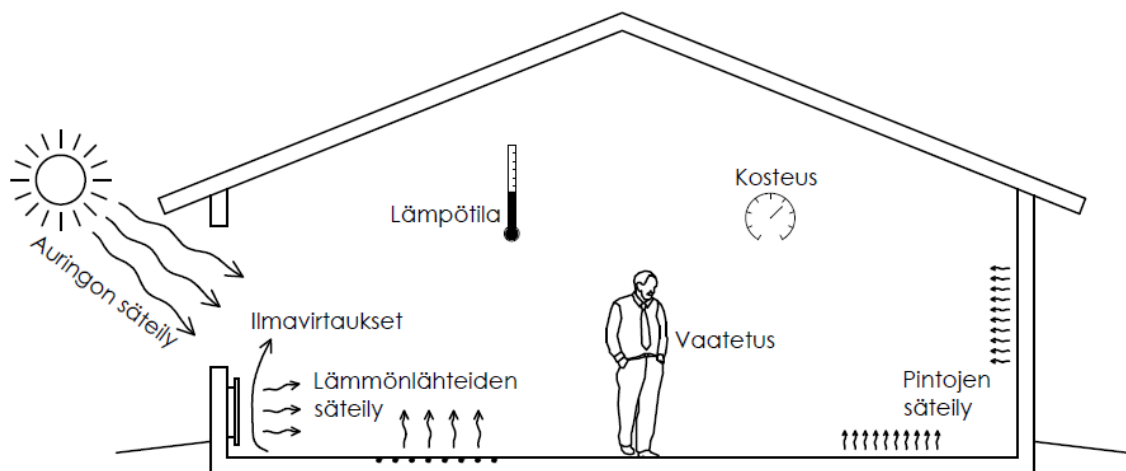
Kuva 1. Pintavastusten vaikutus yksinkertaisen seinärakenteen lämpötilajakaumaan.

3.1.7 Operatiivinen lämpötila

Huonetilassa oleskelevan ihmisen kokema lämpöaistimus riippuu ilman lämpötilan lisäksi sen kosteudesta, ilmavirroista sekä ympäröivien pintojen lämpötiloista. Operatiivisen lämpötilan laskeminen on tapa yhdistää ilman ja pintojen luoma koettu lämpötila, ottamatta kuitenkaan huomioon ilman virtauksia tai kosteutta. Karkea arvio operatiiviselle lämpötilalle voidaan määrittää laskemalla huoneen pintojen keskimääräisen lämpötilan ja huoneen ilman lämpötilan keskiarvo. Operatiivista lämpötilaa voidaan myös mitata tarkoituksenmukaisella pallolämpömittarilla.

3.1.8 Lämpöviihtyvyys

Lämpöviihtyvyydellä kuvataan ihmisen kokemaa lämpöaistimusta, johon vaikuttavat operatiivisen lämpötilan lisäksi ilman kosteus ja nopeus sekä ihmisen kehon lämmöntuotto ja vaatetus. Lämmöntuotto on sitä suurempaa, mitä aktiivisempaa on ihmisen fyysinen toiminta. Tästä johtuen esimerkiksi liikuntahalleissa on syytä pyrkiä pienempään operatiiviseen lämpötilaan kuin toimistotiloissa.



Kuva 2. Asukkaan lämpöviihtyvyyteen vaikuttavat ulkoiset tekijät.

Rakennesuunnittelussa lämpöviihtyvyyteen voidaan vaikuttaa käyttötarkoituksen määrittämisen lisäksi myös valitulla lämmitysjärjestelmällä, ilmanvaihdolla ja rakenneratkaisulla. Myös lämpötilan tasaisuus koetaan yleisesti mukavana, mikä tarkoittaa sitä, että lämpöä varaavat rakenteet yleensä parantavat koettua lämpöviihtyvyyttä. Tämä laskeetaan yleisesti rakenteita lämmittävien järjestelmien, kuten lattia- tai seinälämmityksen eduiksi. Lattia- ja seinälämmitys myös tasoittavat huoneen pystysuoraa lämpötilajakaumaa verrattuna ilmalämmitykseen. (2)

Tarkimmilleen ihmisen kokeman lämpöviihtyvyyden arvioiminen on viety mallinnussovelluksissa, joista esimerkkinä VTT:n kehittämä Human Thermal Model eli HTM. Tämä menetelmä ottaa ulkoisten tekijöiden lisäksi huomioon myös ihmisen anatomian ja sen perusteella eri ruumiinosien ja jopa sisäelinten lämpötilat (4). On kuitenkin suunnittelijan harkintakyvystä kiinni, kuinka tarkasti minkäkin rakennuksen lämpöviihtyvyys on järkevää mallintaa. Useimmissa tapauksissa riittää lasketun operatiivisen lämpötilan antama käsitys koetusta lämpötilasta ja sen suhteuttaminen huonetilan käyttötarkoitukseen. Tätä tukee myös se, että operatiivisen lämpötilan on todettu vaikuttavan huomattavasti enemmän ihmisen kokemaan lämpöaistimukseen, kuin esimerkiksi sisäilman suhteellisen kosteuden (4). Ilmavirtauksien vaikutus lämpöviihtyvyyteen riippuu olennaisesti sisäilman lämpötilasta. Mitä lämpimämpää huoneilma on, sitä vähemmän ilmavirtaukset yleisesti häiritsevät.

3.2 Rakenteiden kosteustekninen toiminta

3.2.1 Yleistä

Kosteus siirtyy rakenteissa pääasiallisesti kaasuna eli vesihöyryinä tai nesteinä eli vetenä. Joissakin tapauksissa se voi siirtyä myös kiinteässä olomuodossa, esimerkiksi tuulen mukana kulkeutuvana lumena. Useimmiten kosteuden siirtymistä ja materiaaliin sitoutumista tapahtuu useissa olomuodoissa samaan aikaan. Nestemäinen vesi siirtyy rakenteissa vedenpaineen, ylipaineen, tuulenpaineen, gravitaatiovoiman tai kapillaarisen imun voimalla. Vesihöyryn siirtymistapoja ovat diffuusio ja konvektio. (5)

Vaikka kosteus rakenteissa käyttäytyy tiettyjen fysiikan lakien mukaan, muodostavat rakenteiden erilaiset ratkaisut ja materiaalit jokaisesta kohteesta kosteusteknisesti omanlaisensa. Olennainen vaikutus rakenneratkaisujen lisäksi on käytettyjen rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyksillä, huokoisuuksilla ja lämmönjohtavuuksilla. Huokosten määrä, koko ja muoto vaikuttavat olennaisesti materiaalin kapillaarisuuteen, joka puolestaan mahdollistaa kosteuden kulkeutumisen materiaalin sisällä. Rakennusmateriaaleissa kosteus siirtyy pääasiallisesti diffuusion tai kapillaarisen liikkeen vaikutuksesta (1). Lämmönjohtavuudet vaikuttavat rakenteen lämpötilan jakautumiseen ja tätä kautta ilmankosteuden mahdolliseen kondensoitumiseen materiaalien pinnoille tai sisälle.

3.2.2 Diffuusio

Diffuusio tarkoittaa ainemolekyylien pitoisuuksien tasaantumista erilaisten olosuhteiden välillä. Vesihöyryn kohdalla se tarkoittaa vesimolekyylien virtausta kosteasta ilmasta kuivempaan. Kosteampi ilma tarkoittaa tässä tapauksessa siis suurempaa vesihöyryn osapaine-eroa. Vesihöyrynläpäisevyys δ kuvaa materiaalin ominaisuutta päästää vesihöyryä lävitseen ja se voidaan esittää joko vesihöyrynpitoisuuksiin tai vesihöyryn osapaine-eroihin perustuvilla arvoilla. Tyypillisesti diffuusiiovirtaus suuntautuu kosteammasta sisäilmasta rakennuksen vaipan läpi kuivempaan ulkoilmaan. Sen voimakkuus

riippuu vesihöyrynpitoisuuksien osapaine-eroista, rakenteiden tiiviyydestä sekä materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksistä. Maanvastaisissa rakenteissa diffuusiovirtaus tapahtuu puolestaan kosteasta maaperästä kellarin rakenteiden läpi sisäilmaan. Kellarin rakenteissa tyypillisiä diffuusion aiheuttamia vaurioita ovat esimerkiksi tiiviin lattiapinnoitteen irtoaminen maapohjan kosteuden kerääntyessä pinnoitteen alle. (2)

3.2.3 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektio on ilmamassan (tai muun kaasun) sisältämän kosteuden siirtymistä ilmavirtausten mukana. Vesihöyryä kuljettavia ilmavirtauksia rakenteissa luovat muun muassa paine-erot, lämpötilaerot, tuuli ja ilmastointilaitteet. Konvektioon liittyvistä kosteusongelmista mainittakoon esimerkkeinä kostean ilmavirran kulkeutuminen rakenteessa olevan reiän tai raon läpi ja kondensoituminen kylmälle pinnalle. (5)

3.2.4 Kondensoituminen

Kondensoituminen perustuu ilman suhteellisen kosteuden riippuvuuteen ilman lämpötilasta. Lämpimämpi ilma pystyy varastoimaan enemmän vesihöyryä, minkä johdosta ilmamassan viilentyessä, sen suhteellinen kosteusprosentti nousee. Saavuttaessaan kastepisteen (lämpötila, jossa $RH = 100\%$), ilmassa oleva kosteus alkaa tiivistyä vedeksi. Tyypillisesti näin käy, kun lämmin ja kostea ilma joutuu kosketuksiin riittävän kylmän pinnan kanssa. Kondensoitumista voi tapahtua sekä materiaalin pinnoilla että sen sisällä diffuusion tai konvektiovirtausten johdosta. (5, 6) Tyypillisimpiä esimerkkejä kondensoitumisesta on sisäilman kosteuden tiivistyminen kylmän ikkunalasin pinnalle.

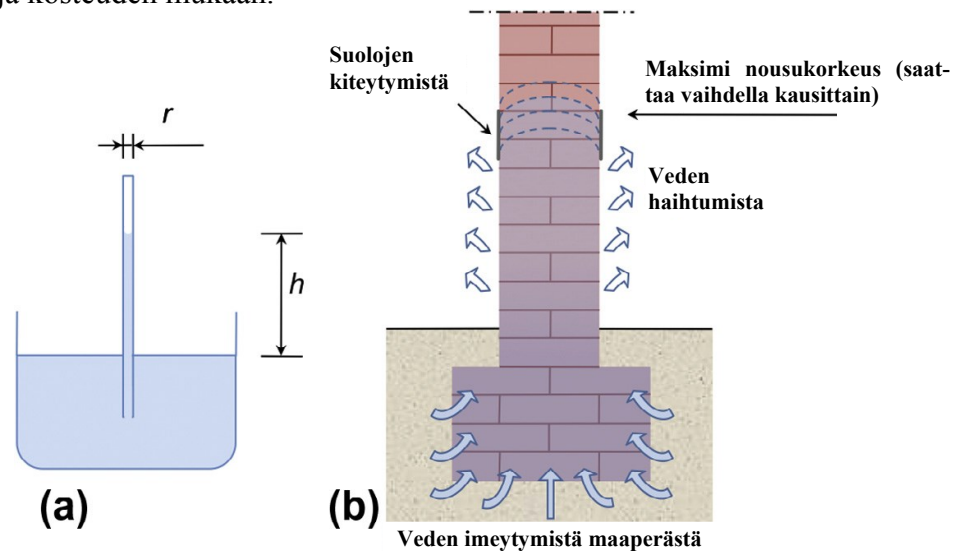
3.2.5 Kapillaarisuus

Kosteuden kapillaarinen siirtyminen on veden kulkeutumista materiaalin huokosissa huokosalipaineen voimalla. Sopivan kokoiset huokokset ja jatkuva huokosverkosto mahdollistavat veden imeytymisen vapaasta vedenpinnasta materiaaliin myös ylöspäin gravitaatiovoimaa vastaan. Optimaalisin huokoskoko kapillaarivirtausten kannalta on 0,1–10 μm , minkä johdosta erityisesti tiilirakenteet ovat alttiita kapillaariselle kosteuden siirtymiselle (5). Vesi voi nousta rakenteisiin kapillaarisesti vapaan veden pinnan lisäksi myös toisesta kapillaarisesti kastuneesta materiaalista tai materiaaliin kondensoituneesta vedestä.

Kapillaariseksi nousukorkeudeksi kutsutaan sitä korkeutta, johon kapillaarinen veden kulkeutuminen pysähtyy (Kuva 3a). Tästä huokosalipaineen ja painovoiman tasapainotilasta voidaan määrittää myös materiaalin kapillaarinen kosteustasapaino, joka tarkoittaa kapillaarisesti kyllästetyn aineen kosteuspitoisuutta. Koska kapillaarinen vesi kulkeutuu myös materiaalien rajapintojen yli, voi kapillaarinen nousukorkeus olla suurempi kuin materiaalikerroksen korkeus.

Kapillaarinen nousukorkeus riippuu materiaalin ominaisuuksien lisäksi myös rakenteen muodosta ja paksuudesta sekä mahdollisesta pinnoitteesta. Esimerkiksi paksussa rakenteessa on pienempi haihtumispinta-alan ja tilavuuden suhde kuin ohuemmassa. Suhteellisesti pienemmän haihtumisen johdosta paksumpi rakenne kuivuu siis hitaammin, minkä johdosta vesi ehtii nousta kapillaarisesti korkeammalle. Sama vaikutus on myös tiiviillä pinnoitteilla, jotka ehkäisevät veden haihtumista rakenteesta. (6) Toisin sanoen haihtumaan pääsevä vesi laskee todellisissa tilanteissa materiaalille ominaista kapillaar-

rista nousukorkeutta. Haihtumisen johdosta nousukorkeus myös vaihtelee ulkoilman lämpötilan ja kosteuden mukaan.



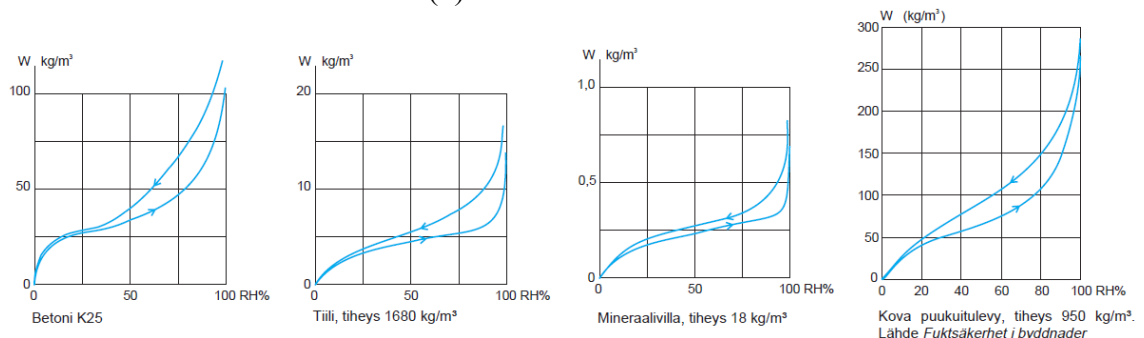
Kuva 3. a) Veden nouseminen ideaalisessa kapillaariputkessa. Putken paksuus r vaikuttaa olennaisesti kapillaarisen veden korkeuteen h . b) Kapillaarinen nousu muuratussa sokkelirakenteessa. Pohjavesi imeytyy tiilirakenteita pitkin ylöspäin ja haihtuu lämpötilan noustessa huoneilmaan. (7)

Myös rakeisilla aineilla, kuten hiekalla on kyky imeä vettä kapillaarisesti. Rakeisten aineiden kapillaarisuus riippuu olennaisesti materiaalin raejakaumasta. Mitä pienempi raekoko, sitä suurempi määrä vettä voi materiaaliin sitoutua. Maa-aineksissa tämä näkyy kapillaarisen nousukorkeuden erona esimerkiksi hiekan ja saven välillä. Tiiviin saven yli 10 metrin kapillaarinen nousukorkeus verrattuna löyhän hiekan noin 3 cm:n nousukorkeuteen (6). Tästä syystä suuremman raekoon omaava sepeli on toimiva materiaali estämään veden kapillaarinen nousu rakennuksen alla.

3.2.6 Hygroskooppisuus

Hygroskooppisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä sitoa tai luovuttaa kosteutta ympäröivän ilman vesihöyrynpitoisuuden perusteella. Kuiva hygroskooppinen materiaali siis imee kosteutta huoneilmasta ja haihduttaa sen takaisin tilanteessa, jossa ilman kosteus on pienempi kuin materiaalin huokosten kosteus.

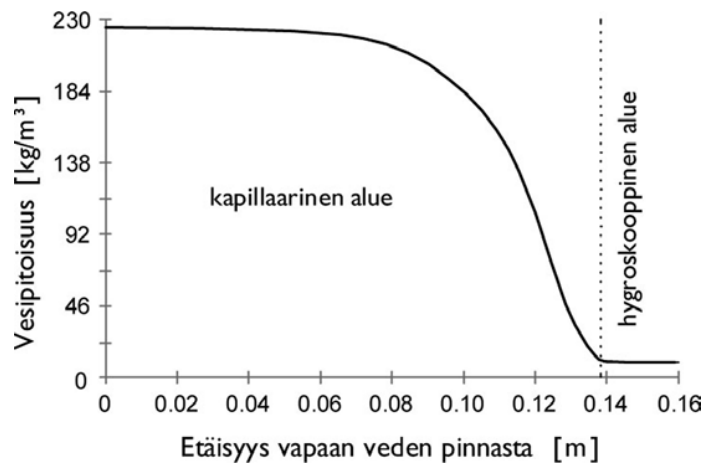
Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa tilannetta, jossa materiaalin ja ympäröivän ilman kosteudet ovat tasapainossa. Tasapainokosteuteen vaikuttavat lämpötila, materiaalin huokoisuus sekä ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Hygroskooppisuuden vaikutus korostuu erityisesti sadepäivinä, jolloin myös sisäilman kosteuspitoisuus nousee ilmanvaihdon vaikutuksesta. (5)



Kuva 4. Erilaisten rakennusaineiden hygroskooppisia tasapainokosteuksia (8)

Kuvassa 4 on esitetty erilaisten materiaalien hygroskooppisia tasapainokäyriä, joista voi nähdä selvän eron materiaalin kastumisen ja kuivumisen välillä. Hystereesin johdosta materiaali on samassa suhteellisessa kosteustilassa kosteampi kuivuessaan kuin kastuessaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että esimerkiksi 80 %:n suhteellisessa kosteudessa puukuitulevy voi sisältää vettä 100-150 kg/m³ riippuen siitä, onko se kastumassa vai kuivumassa.

Kuvan 4 tasapainokosteuskäyristä voi myös nähdä selvät erot eri materiaalien hygroskooppisten ominaisuuksien välillä. 80 %:n suhteellisessa kosteudessa olevan mineraalivillan sisältämä vesimäärä on luokkaa 0,3 kg/m³, joka on siis alle sadasosa aiemmin mainitun puukuitulevyn vastaavasta arvosta. Kirjallisuudesta löytyviä tasapainokosteuskäyriä voidaan pitää käytännössä lähinnä suuntaa antavina. Esimerkiksi betonin ominaisuudet riippuvat olennaisesti muun muassa betonin valmistuksessa käytetyistä ainesosista, vesisementtisuhteesta, iästä ja kunnosta. Tarkat arvot voidaan tarvittaessa mitata laboratorio-olosuhteissa. (6)



Kuva 5. Tiilen kapillaarisesti ja hygroskooppisesti sitoma vesimäärä (6)

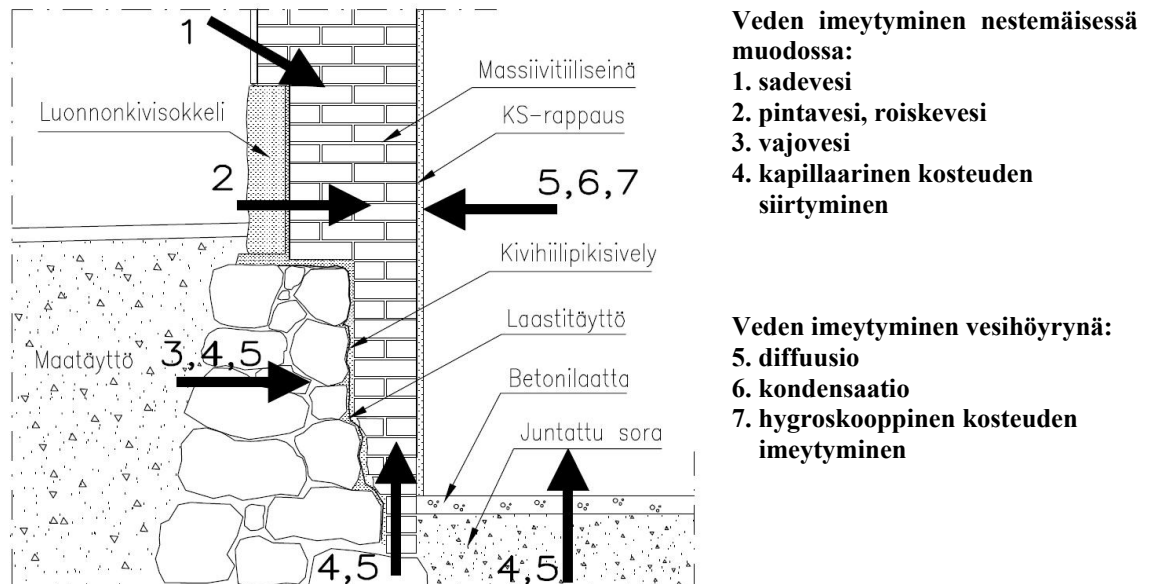
Kuvassa 5 on havainnollistettu kapillaarisesti ja hygroskooppisesti imeytyvän vesimäärän ero tiilirakenteessa. Kapillaarinen imeytyminen kastelee rakenteita siis huomattavasti enemmän kuin hygroskooppinen kosteuden sitoutuminen. Kuvaajassa näkyvä kapillaarisen veden kyllästämä alue kasvaa ja hygroskooppinen alue siirtyy kauemmaksi vapaan veden pinnasta, kunnes materiaalin kapillaarinen kosteustasapaino saavutetaan. Hygroskooppisen alueen kosteuspitoisuus on riippumaton etäisyydestä veden pintaan ja vaihtelee lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mukaan. Materiaali on hygroskooppisella alueella, kun sen suhteellinen kosteus on alle 98-99 %. (2)

3.2.7 Painovoimainen siirtyminen

Kosteuden painovoimainen siirtyminen tarkoittaa veden virtausta rakenteissa, joissa on selvät kulkureitit vedelle tai materiaaleissa, joissa huokoskoko on yli 10 µm. Sade-, pinta- ja vuotovedet kulkeutuvat rakenteissa pääasiallisesti gravitaatiovoiman avulla. Sadevedet voivat tunkeutua rakenteisiin myös paineenalaisina, esimerkiksi tilanteessa, jossa tuuli painaa sateen pystysuoraa seinää vasten. (5)

3.2.8 Kosteuslähteet

Kuvassa 6 on esitetty seinien ja alapohjarakenteiden pääasialliset kosteusrasitukset. Kunkin eri rasituksen vaikutuksen suuruus riippuu siis käytetyistä rakennratkaisuista ja materiaaleista sekä vallitsevista sisä- ja ulkoilmastoista. Kosteusvaurioita ehkäisevät toimenpiteet pitävät sisällään rakennratkaisujen lisäksi myös pinta- ja vajovesien poiston rakenteen läheisyydestä. Kuvassa esitettyjen kosteusrasitusten lisäksi yleinen kosteusvaurioiden aiheuttaja on vuotovesi.



Kuva 6. Seinien ja maanvastaisten rakenteiden kosteusrasitukset. (1)

Rakennuksen katon ja seinien pääasiallinen kosteusrasitus on sadevesi, joka voi sataa joko pystysuoraan ylhäältä tai tuulenpaineen aiheuttamana viistosta. Seinärakenteiden kannalta olennaisinta on viistosade, joka kastelee seiniä Suomessa yleensä lounaan suunnalta. Sadevesi rasittaa seiniä myös välillisesti roiskuessaan muista rakenteista tai maasta.

Maan pinnalle kerääntyvä vesi pyritään yleensä ohjaamaan pois päin rakennuksesta kalistuksien avulla. Osa pintavedestä kuitenkin imeytyy maahan rakennuksen läheisyydessä ja rasittaa sen maanvastaisia rakenteita ajoittaisena vajovetenä. Maahan imeytynyt vesi päättyy lopulta rakennusta ympäröiviin salaojaviemäriin tai pohjavedeksi. Pohjavesi on yleensä alueen muihin vesistöihin yhteydessä olevaa vettä, jonka pinta vaihtelee muun muassa maaperän muotojen ja sademäärien mukaan. Pohjaveden kyllästämästä kerroksesta vesi pyrkii vaakasuuntaisen virtauksen lisäksi myös nousemaan kapillaarisesti ylöspäin. Ilman kapillaarista nousua katkaisevaa maakerrosta tai rakenteellista kapillaarikatkoa pääsee vesi todennäköisesti nousemaan rakenteisiin asti.

Maaperän kapillaarinen veden nousu aiheuttaa myös sen, että rakennuksen alla vallitsee lähes aina suuri suhteellinen kosteuspitoisuus. Yleensä maaperän kosteuspitoisuuden oletetaan olevan 100 % (9), mikä aiheuttaa kosteuden kulkeutumisen rakennuksen kuivempia sisäosia kohti myös diffuusion välityksellä. Vanhoissa rakennuksissa ei välttämättä ole lainkaan kapillaarikatkoa tai sen toiminta voi olla puutteellista. Tällaisissa tapauksissa vesi nousee rakenteisiin diffuusion lisäksi myös kapillaarihuokosia pitkin.

Koska sisäilma on yleensä kosteampaa kuin ulkoilma, siirtyy kosteus diffuusion välityksellä myös seinärakenteiden läpi sisäilmasta ulospäin. Joissakin tapauksissa tämä

saattaa aiheuttaa kosteuden kerääntymistä, jos esimerkiksi diffuusion nostama seinän sisäinen kosteuspitoisuus kondensoituu rakenteen sisälle. Myös hygroskooppiset rakennusmateriaalit imevät kosteammasta huoneilmasta kosteutta itseensä ja luovuttavat sitä sisäilman kuivuessa. Jos rakenteissa on rakoja tai epäjatkuvuuskohtia esimerkiksi höyrinsulussa, saattaa kosteus kulkeutua myös paine-erojen aiheuttamien konvektiovirtausten mukana. Tällainen tilanne luo yleensä riskin ulos virtaavan kostean ilman kondensoitumisesta rakenteiden sisällä oleville kylmille pinnoille.

3.3 Materiaalien lämpö- ja kosteustekninen toiminta

3.3.1 Yleistä

Rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteustekninen toimivuus kulkevat käsi kädessä. Materiaalin lämpötila ja sen sisältämä vesimäärä vaikuttavat molemmat osaltaan sen lämmönjohtavuuteen ja näin ollen myös koko rakenteen lämmöneristävyyteen. Aineen lämpötila vaikuttaa olennaisesti myös sen kuivumiskykyyn ja sitä kautta sen sisältämään vesimäärään.

Yleisesti ottaen lämmönjohtavuus siis suurenee, kun suhteellinen kosteus kasvaa tai kun lämpötila nousee. TTY:n vuonna 2005 suorittamissa kokeissa lämmönjohtavuudet kasvoivat enimmillään 19%, kun RH nousi 0 %:sta 97 %:iin. Tutkimuksessa kuitenkin todettiin todellisten muutosten olevan pienempiä, sillä kosteuden ja lämpötilan aiheuttamat muutokset lämmönjohtavuuksissa vaikuttavat käytännössä eri suuntiin. Lämmönjohtavuuden muutokset lämpötilan ja kosteuden mukaan riippuvat huomattavasti käytössä olevasta materiaalista. Kosteuden vaikutus lämmöneristävyyteen oli huomattavasti selkeämpi hygroskooppisilla materiaaleilla, kuten tiilellä, kuin esimerkiksi mineraalivilillä. Materiaalin tiheydellä huomattiin myös olevan vaikutus asiaan siten, että tiheimillä materiaaleilla lämmönjohtavuuden muutokset olivat yleensä suurempia. (10)

Samansuuntaisia tuloksia saivat myös Ákos Lakatos ja Ferenc Kalmár (11), jotka toteavat julkaisussaan koekappaleen painon mukaan lisätyn 0,5-1 %:n vesimäärän (RH:n muutos noin 0...95%) vaikuttavan noin 5-6 % puolen metrin paksuisen solumuovilla eristetyn kiviseinärakenteen lämmöneristävyyteen. Samassa tutkimuksessa todettiin myös suuria eroja erilaisten materiaalien välillä, mistä seurasi, että lämmönjohtavuuden muutos kosteuden johdosta oli prosentuaalisesti suurempi rakenteissa, joissa oli ohuempi kerros eristettä. Tätä tukee myös Frösselin kirja, jonka mukaan massiivitiiliseinän lämmöneristävyys laskee jopa 50 %, kun sen kosteus painon suhteen nousee neljään prosenttiin (12). Kivipohjaisissa materiaaleissa kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen on siis huomattavasti suurempi kuin lämmöneristeissä. Sekä TTY:n että Lakatoksen ja Kalmárin suorittamista tutkimuksista on kuitenkin hyvä todeta, että ne suoritettiin ainoastaan hygroskooppisella alueella, missä vaikutus on todennäköisesti vähäisempi kuin kapillaarisella alueella. Esimerkiksi tämän työn kannalta olennaisia kapillaarisen veden kastelemien materiaalien lämmönjohtavuuksia ei tutkittu.

Kastunut ja näin ollen tyypillisesti kylmempi materiaali myös lisää kondensoitumisen riskiä, mikä tarkoittaa sitä, että joissakin tapauksissa seinämateriaalin kastuminen saattaa olla itseään ruokkiva prosessi. Seuraavissa kappaleissa on esitelty tämän tutkimuksen mallinnusten ja koekohteen kannalta olennaisimpia rakennusmateriaaleja ja niiden käyttäytymistä työn aiheen kannalta olennaisissa rakennusfysikaalisissa olosuhteissa.

3.3.2 Lämmöneristeet

Mineraalivillat

Mineraalivillat jakautuvat pääasiallisen raaka-aineensa mukaan kivivilloihin, lasivilloihin ja kuonavilloihin. Epäorgaanisesta raaka-aineesta valmistetut 2-10 millimetrin pituiset kuidut sidotaan toisiinsa orgaanisella sideaineella. Lisäksi mineraalivilloja saatetaan käsitellä esimerkiksi öljyllä muun muassa vedenhyлкivyyden parantamiseksi. Mineraalivillojen lämmöneristävyys perustuu pääasiassa paikallaan olevan ilman alhaiseen lämmönjohtavuuteen sekä säteilemällä siirtyvän lämpöenergian ehkäisemiseen.

Tyypillisesti mineraalivillalevyn lämmönjohtavuus λ on noin 0,031-0,041 W/(m·K). Koska mineraalivillan kapillaariset ja hygroskooppiset ominaisuudet ovat pienet tai lähes olemattomat, ei ilman suhteellisen kosteuden muutoksilla ole juurikaan vaikutusta sen lämmönjohtavuuteen. Tästä johtuen kosteuden vaikutus lämmöneristävyyteen esimerkiksi mineraalivillalla eristetyssä tiilirakenteessa on suhteellisesti pienempi, kuin vastaavassa eristämättömässä rakenteessa. Lämpötilan vaikutus lämmöneristeiden lämmönjohtavuuksiin on kuitenkin yleisesti suurempi kuin useimmilla muilla materiaaleilla. (9)

Solumuovit

Solumuovit ovat nimensä mukaisesti solumaisesta rakenteesta koostuvia muoveja. Suomalaisessa rakentamisessa käytetyimpiä solumuovisia tuotteita ovat polystyreenistä ja polyuretaanista valmistetut umpisoluiset lämmöneristeet. Solumuovieristeiden tilavuudesta on tyypillisesti vain hyvin pieni osa (2-3 %) muovia ja loput ilmaa tai kaasuseosta.

Styroxina kansanomaisesti tunnettu EPS on polystyreenistä punnekaasun avulla paisuttamalla valmistettu eriste. Umpisoluisen rakenteensa ansiosta EPS on tavanomaisissa oloissa kohtuullisen hyvin kosteutta kestävä lämmöneriste. Maanvastaisissa rakenteissa se saattaa kuitenkin vettyä ja menettää osan lämmöneristävyydestään.

XPS puolestaan on polystyreenistä suulakepuristamalla valmistettu solumuovieriste, jonka vesihöyrynläpäisevyys on sen verran EPS:ää pienempi, että sitä voidaan käyttää myös höyrynsulkuna. XPS ei myöskään ime kapillaarisesti vettä, joten sitä voidaan käyttää hyvinkin märissä olosuhteissa. XPS-levyt eivät siis juurikaan muuta lämpötekniisiä ominaisuuksiaan ympäristön kosteusolosuhteiden johdosta.

Polystyreenin lisäksi solumuovisia lämmöneristeitä valmistetaan punnekaasujen avulla myös polyuretaanista. Polyuretaanin tiiviin ja umpinaisen solurakenteen johdosta se ei ime kapillaarista kosteutta. Polyuretaanilevyjen kanssa voidaan käyttää diffuusioavoimia tai diffuusiotiiviitä pinnoitteita, joilla voidaan halutessa vaikuttaa materiaalikerroksen toimimiseen höyrynsulkuna.

Edellä mainituille solumuovisille lämmöneristeille on yhteistä hyvin pieni hygroskooppinen kosteuden imeytyminen ympäröivästä ilmasta. Tästä johtuen ympäröivän ilman kosteudella ei ole merkittävää vaikutusta solumuovien lämmönjohtavuuksiin (11). Kapillaarisella vedellä on vaikutusta edellä mainituista ainoastaan EPS:n lämmönjohtavuuteen. (9)

3.3.3 Runko- ja pintamateriaalit

Betoni

Betoni on yksi käytetyimmistä materiaaleista nykypäivän rakentamisessa. Se koostuu yksinkertaisimmillaan sementistä, vedestä ja runkoaineesta, joka voi olla esimerkiksi luonnonkiveä. Näiden lisäksi betonin ominaisuuksia muokataan usein myös muilla ainesosilla. Kuten myös muilla massiivisilla materiaaleilla, on betonilla suuri ominaislämpökapasiteetti ja näin ollen kyky varata paljon lämpöä itseensä.

Betonin ominaisuudet riippuvat huomattavan paljon sen valmistuksesta ja käytetyistä raaka-aineista. Useimmiten käytetyt betonilaadut ovat huokosrakenteensa johdosta sekä hygroskooppisia että kapillaarisia. Betoni siis kerää tyypillisesti helposti kosteutta itseensä. Tämän johdosta betonin sisältämä kosteus vaikuttaa myös sen rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi edellä esitellyillä eristemateriaaleilla. Betonin lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyys kasvavat, kun sen kosteuspitoisuus nousee. (9) Etelä-Koreassa tehdyissä tutkimuksissa (13) kuivan betonin lämmönjohtavuus oli parhaimmillaan 66 % määstä betonista mitatusta arvosta. Koepalojen lämpötilan vaikutus lämmönjohtavuuteen oli huomattavasti pienempi.

Vaikka itse betoni kestää muun muassa alkalisuutensa ansiosta hyvin kosteutta, on sen kastumisella yleensä vaikutuksia ympäröiviin materiaaleihin sekä edellä mainittujen tutkimusten perusteella rakenteen lämmöneristävyyteen. Betonin kastumisen aiheuttamat ongelmat näkyvät yleensä sen sisältämien raudoitusten tai siihen liittyvien orgaanisten materiaalien vaurioissa. Tämän työn mallinnuksissa käytettiin WUFI[®]:n Fraunhofer-IBP tietokannan mukaista C35/45 betonia.

Tiilet

Tiili on savesta polttamalla valmistettu keraaminen rakennusaine, jota on Suomessa käytetty jo keskiajalta lähtien. Tiilen pääraaka-aineena ovat yleensä savi ja hiekka, joista muovataan ja poltetaan noin 950 – 1100 °C:n lämpötilassa halutun muotoisia muuratavia rakennusosia. Käytetyn saven laadun ohella tiilen polttolämpötila on olennainen valmiin tuotteen ominaisuuksien kannalta. Korkeammissa lämpötiloissa poltetut tiilet ovat tiheämpiä ja omaavat näin ollen myös suuremman lujuuden. Matalammissa lämpötiloissa poltetut tiilet ovat puolestaan huokoisempia, minkä vuoksi ne eristävät paremmin lämpöä. Tiilen lämmöneristävyyteen vaikuttaa myös olennaisesti tiilen reikäisyys, joka muodostaa tiilirakenteen sisälle eristäviä ilmataskuja.

Tiilille ominaista on suuresta 10-50 %:n huokoisuudesta johtuvat kapillaariset ominaisuudet sekä veden imeytymisestä seuraava pakkasrapautumisen riski. Kapillaarista vettä voi imeytyä tiilen laadusta riippuen jopa 25% kuivapainosta, mikä tarkoittaa isoimmillaan 420kg/m³:n vesimäärää rakenteessa. Hygroskooppisesti tiileen voi imeytyä vettä vain noin 15 kg/m³. Tiilen polttoasteella ja näin ollen tiheydellä on olennainen vaikutus myös veden kapillaariseen imeytymiseen. Esimerkkeinä mainittakoon kevyempi $\rho=1700 \text{ kg/m}^3$ -tiili, jonka vedenimeytymiskerroin $A_w=0,39 \text{ kg/(m}^2\text{s}^{0,5})$ ja tiiviimpi $\rho=1900 \text{ kg/m}^3$ -tiili, jonka $A_w=0,09 \text{ kg/(m}^2\text{s}^{0,5})$. (9)

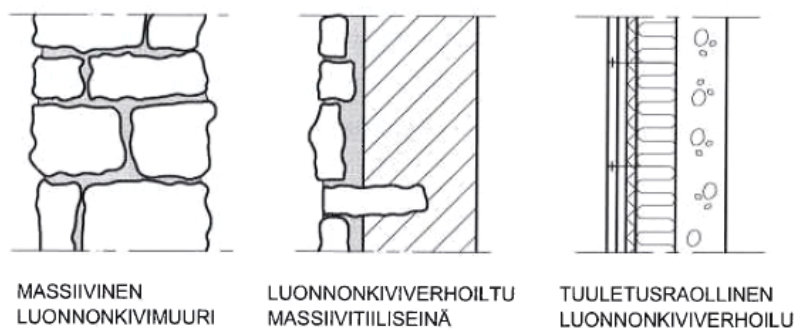
Erityisesti vanhemmissa tiilirakennuksissa tiilien laadut voivat vaihdella suuresti. 1800- ja 1900-luvun taitteessa samalta tehtaalta ja jopa samasta polttoerästä tulleiden tiilien polttoasteet saattoivat vaihdella keskenään, jonka seurauksena yhdessä ja samassa ra-

kennuksessa on voitu käyttää hyvinkin erilaatuisia tiiliä. Tuohon aikaan tapana oli kuitenkin sijoittaa suuremman polttoasteen omaavat tummemmat tiilet rakennusten kantaan viin seiniin ja kriittisimpiin kohtiin. Koska temperierungia tutkitaan tässä työssä erityisesti korjausrakentamiseen soveltuvana menetelmänä, on laskelmissa käytettävän tiilen ominaisuudet valittu Suomessa tyypillisesti 1900-luvun alkupuolella käytettyjen tiilien ominaisuuksia mukaillen. WUFI® 2D -ohjelman Fraunhofer IBP -tietokannan (14) ”historical solid brick” sopi hyvin vastaamaan *Kerrostalot 1880-1940* (15) -kirjan tietojen pohjalta määriteltyä tiilirakennetta.

Luonnonkivet

Luonnonkivet ovat yksi vanhimmista ihmisen käyttämistä rakennusmateriaaleista. Järjestelmällistä rakentamiseen käytettävän luonnonkiven louhintaa on tehty nykytiedon mukaan jo noin 4000 vuotta. Nykyisessä suomalaisessa rakennuskannassa luonnonkiveä on käytetty lähinnä julkisivumateriaalina tai muissa pintarakenteissa. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että muun muassa tiili ja betoni ovat jo pidemmän aikaa syrjäyttäneet sen runkomateriaalina. (16) Vanhemmassa rakennuskannassa luonnonkiveä on käytetty myös kantavissa rakenteissa, kuten esimerkiksi luonnonkivimuureissa ja perustuksissa.

Luonnonkivistä tämän työn kannalta olennaisin on graniitti, joka on yksi yleisimmistä kivilajeista Suomen maaperässä. Osin tästä ja osin sen ominaisuuksista johtuen se on myös käytetyimpiä kivilajeja suomalaisessa rakentamisessa. Erityisesti julkisivumateriaalina on suurta etua graniitin lujuudesta, kovuudesta, tiiviyydestä ja pienestä huokoisuudesta, joiden ansiosta se kestää hyvin myös Suomen olosuhteissa. Luonnonkiviverhouksena käytettäessä graniitti muodostaa sekä pakkasta kestävän että todella vähän vesihöyryä läpäisevän pinnan. (5)



Kuva 7. Luonnonkiviverhottuja julkisivuleikkauksia eri aikakausilta. (17)

Kuvassa 7 on esitetty periaatepiirroksia eri aikakausilla sovelletuista luonnonkiviverhouksista julkisivuista. Kuten kuvasta voi todeta, ovat rakennekerrokset lisääntyneet ja luonnonkiviverhouksen paksuudet pienentyneet ajan myötä. Nykyään luonnonkiviverhouksen taakse jätetään yleensä kosteusteknisistä syistä tuuletusrako. Keskimmäisenä oleva luonnonkiviverhoiltu massiivitiiliseinä on vastaavanlainen kuin myöhemmin tässä työssä esitellyssä koekohteessa. Tämän tyyppisiä seinärakenteita tehtiin erityisesti 1900-luvun vaihteen rakennuksissa ja niiden on todettu olevan kosteustekniseltä toiminnaltaan puutteellisia. Ongelmana on tyypillisesti kosteuden kapillaarinen nousu ja viistosateen helppo pääsy laastisaumojen läpi yhdistettynä seinän huonoon kuivumiskykyyn. Koska laastisaumojen haihduttava pinta-ala on seinän tilavuuteen verrattuna pieni, on rakenteen kuivuminen ulospäin erittäin hidasta. Joissakin kohteissa veden pääsyä rakenteisiin on yritetty estää luonnonkiviverhouksen ja tiilimuurauksen välisellä bitumisive-

lyllä. Bitumin on kuitenkin todettu monissa kohteissa vaurioituneen seinärakenteen liikkeiden johdosta ja näin ollen vuotavan sadevettä rakenteisiin. (17)

Laastit

Laastin tarkoituksena on sitoa muurauskappaleita yhteen ja muodostaa siten yhtenäinen rakenne. Yhteen liitettäviä muurauskappaleita voivat olla esimerkiksi edellä mainitut tiilet tai luonnonkivet. Tyypillisesti laastit koostuvat sideaineesta, runkoaineesta, vedestä ja yleensä joistakin ominaisuuksia parantavista lisäaineista. Alun perin laastien sideaineena on käytetty sammutettua kalkkia ja runkoaineena hiekkaa. Nykyisin kalkkilaastin lisäksi usein käytettyjä laasteja ovat muun muassa sementtilaasti ja kalkkisementtilaasti, joissa kalkki on osittain tai kokonaan korvattu sementillä. Laastien luokittelu tehdäänkin yleensä käytetyn sideaineen mukaan. (5)

Myös laastien ominaisuudet riippuvat olennaisesti sen valmistukseen käytetyistä ainesosista. Esimerkiksi edellä mainittujen kalkki- ja sementtipohjaisten laastien vesihöyrynläpäisevyydet vaihtelevat välillä $0,2 \dots 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ siten, että sementtipohjaiset läpäisevät huomoinen vesihöyryä. Pienemmän vesihöyrynläpäisevyyden lisäksi sementtilaasteilla on tyypillisesti myös pienempi kapillariteettikerroin, suurempi lujuus sekä parempi säänkestävyys. (5) Muita laastien ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa käytetyn sideaineen polttoaste, karbonatisoitumisaste, ympäröivien tiilien imukyky, laastin sekoitus ja mahdolliset lisäaineet (17).

Erityisesti julkisivuissa käytettävien laastien yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on sen pakkaskestävyys, johon voidaan vaikuttaa oikeanlaisella huokoskoolla. Jukka Lahdensivun (17) mukaan huokosten optimaalinen koko on 10-100 μm , jolloin ne eivät täyty kapillaarisesta vedestä ja kestävät näin ollen paremmin pakkasen aiheuttamia rasituksia. Huokosrakenteesta ja vedenimukyvystä johtuen laasteille ovat myös tyypillisiä kastumisen aiheuttamat voimakkaat lämmönjohtavuuden muutokset. Nottinghamin yliopistossa tehdyissä koemittauksissa erilaisten laastien lämmönjohtavuudet nousivat noin 40-60 %, kun ne kylästettiin vedellä (18).

3.4 Rakennusfysikaalinen mallintaminen

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä mallintamista varten on kehitetty useita eri ohjelmistoja. Tätä työtä varten tehdyt mallinnukset suoritettiin WUFI® Pro ja WUFI® 2D -ohjelmilla, jotka harkinnan jälkeen todettiin soveltuvimmiksi tutkittavan aiheen tarpeisiin. WUFI® -ohjelmat ovat myös yleistymässä rakennusfysikaalisessa suunnittelussa, joten tämä oli luonteva tapa opetella työelämässä tarvittavien ohjelmien käyttöä. Kyseessä ovat siis samaan tuoteryhmään kuuluvat yksi- ja kaksidimensioiset rakennusfysikaaliset mallinnusohjelmat. Molemmissa ohjelmissa lämmön ja kosteuden mallinnus on kytketty toisiinsa ja mallinnukset suoritetaan ajasta riippuvaisina. Tarvittaessa ohjelmilla voidaan mallintaa myös vakio-tilassa. Tämä kuitenkin vaatii käyttäjältä lähtötietojen syöttämistä ajasta riippumattomina vakioina sekä mallinnuksen suorittamista riittävän pitkälle aikavälille, jotta lämpö- ja kosteusvirrat asettuvat tasapainoon.

WUFI® -ohjelmissa mallinnettava rakenne luodaan suorakaiteen muotoisista paloista, joille määritellään halutut materiaaliominaisuudet. Ominaisuudet voidaan valita olemassa olevista tietokannoista tai vaihtoehtoisesti syöttää käsin. Ohjelman käyttäjä myös määrittää itse, kuinka tiheällä laskentaverkolla laskelmat suoritetaan. Tiheämpi verkko laskee lämpö- ja kosteusvirrat tarkemmin, mutta toisaalta hidastaa suoritettavaa mallin-

nusta huomattavasti. Tässä työssä tehtyjen mallinnusten laskelmat veivät ohjelmalta pisimmillään useita tunteja.

Laskentaverkon ja materiaalien valintojen jälkeen tulee käyttäjän määrittää lähtötilanne sekä mallin reunaehdot. Lähtötilanne pitää sisällään jokaisen materiaalin lämpötilan ja kosteuspitoisuuden mallinnuksen aloitushetkellä. Mallin reunaehdot määritetään kaikille ulkoreunoille erikseen siten, että olosuhteet kuvaavat mahdollisimman hyvin oikeaa rakennusosaa ympäröiviä olosuhteita. Jos mallinnettu rakenne on katkaistu ja jatkuu samanlaisena johonkin suuntaan, on hyvä käyttää adiabaattista reunaehto, jonka läpi kosteus- ja lämpövirrat eivät kulkeudu. Ulko- ja sisäolosuhteet voidaan määrittää itse tai käyttää ohjelman tietokannoista löytyviä valmiita säätiedostoja eri paikkakunnille Euroopassa. Reunaehtoina voidaan käyttää myös omatoimisesti mitattuja tai paikalliselta sääasemalta saatuja lämpö- ja kosteustietoja. Rakenteelle määritetään myös ilmansuunta, kaltevuus sekä pintamateriaalin ominaisuudet, jolloin myös sateen ja auringon aiheuttamat rasitukset otetaan huomioon.

Edellä mainittujen lähtötietojen lisäksi voidaan malliin syöttää myös mahdollinen lämmön- tai kosteudenlähde, jolla voidaan mallintaa esimerkiksi lattialämmitystä tai vesivuotoa. Lopuksi ennen varsinaista mallinnuksen suorittamista on käyttäjällä mahdollisuus valita laskelmien tarkemmat tiedot, kuten esimerkiksi mallinnusaika. Ohjelma suorittaa laskelmat aiemmin määritetyllä laskentaverkolla ja tunnin aika-askeleilla halutulle aikavälille.

Rajoitteena WUFI® 2D -ohjelmassa on kuitenkin sen kykenemättömyys mallintaa konvektiovirtausten välityksellä kulkeutuvaa lämpöenergiaa. Tämä johtaa siihen, että tämän työn mallinnuksista jää pois seinän pinnalla nousevien pienten ilmavirtauksen lämmitävä ja kuivattava vaikutus seinän yläosissa. Kirjallisuudesta löytyvän kokemuseräisen tiedon perusteella WUFI®-mallinnukset vastaavat kuitenkin suhteellisen hyvin temperierung-menetelmällä lämmitetyistä rakenteista mitattuja todellisia arvoja. Vaatimuksena on luonnollisesti kuitenkin todellista tilannetta kuvaavat lähtötiedot. (19)

3.5 Kosteuden aiheuttamat vauriot rakenteissa

Suomen rakennetun omaisuuden tilaa arvioivan ROTI 2017 -raportin mukaan (20) noin 10-20 % Suomen rakennuskannasta kärsii jonkinasteisista kosteus- ja homevaurioista. Huonoimmassa kunnossa ovat erityisesti koulut, päiväkodit ja hoitolaitokset. Samassa raportissa arvioidaan 560 000-960 000 suomalaisen altistuvan päivittäin huonolle sisäilmalle joko koulussa, työpaikalla tai kotona. Rakentamisen kosteusongelmat koskevat siis huomattavaa osaa Suomen kansasta sekä terveyden että talouden kannalta. Vuosittaiset kosteus- ja homeongelmista aiheutuvat kustannukset lasketaankin miljardeissa euroissa.

Jotta kosteuden aiheuttamia vaurioita pystytään korjaamaan ja varsinkin ehkäisemään, on ymmärrettävä niiden alkuperä sekä vaikutukset rakenteisiin ja niiden käyttäjiin. Tyyppillisesti kosteudesta aiheutuu ongelmia, kun se ei pääse poistumaan rakenteista riittävän nopeasti. Tämä voi johtua esimerkiksi rakennuksen kärsimisestä vaurioista, rakennusvirheistä tai käyttövirheistä. Lyhytaikaiset liiallisiksi kohonneet kosteuspitoisuudet eivät yleensä aiheuta vaurioita. Kosteusvaurioita korjattaessa on tärkeää poistaa vaurioituneiden rakennusmateriaalien lisäksi myös kosteusvaurioon johtanut syy, jotta ongelmat eivät uusiutu.

Kosteuden aiheuttamat vauriot voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin (12). Fysikaaliset ja kemialliset vaikutukset vaikuttavat pääosin kivipohjaisiin rakennusmateriaaleihin ja rakennuksiin. Biologiset vaikutukset puolestaan vaikuttavat lähinnä ihmisten hyvinvointiin ja orgaanisiin rakennusmateriaaleihin. Tämän diplomityön kannalta olennaisimmat vauriot ovat mikrobikasvustot, suolojen aiheuttamat vauriot sekä rakennusmateriaalien yhteydessä käsitelty lämmöneristävyyden aleneminen.

3.5.1 Mikrobikasvustot

Ihmisten terveyden kannalta haitallisimmat kosteuden aiheuttamat vauriot rakenteissa liittyvät erilaisiin mikrobikasvustoihin. Jatkuva korkea kosteuspitoisuus, sopiva lämpötila ja mikrobeille kelpaava ravinto mahdollistavat yhdessä home- ja sienikasvustoille suotuisat olosuhteet. Useimpien mikrobilajien kasvun kannalta vaarallisimmat olosuhteet ovat 20-30°C lämpötila ja 95-99 %:n ilman suhteellinen kosteus tai vastaavasti materiaalin vesiaktiivisuus 0,95-0,99. Vähimmäisvaatimukset homeen kasvuille herkimmillä rakennusmateriaaleilla alkavat, kun lämpötila on +5...+50 C°:n välillä ja ilman suhteellinen kosteus ylittää 70 %. (6)

Lämpötilan ja kosteuden lisäksi myös itse materiaalilla on suuri vaikutus homehtumis-herkkyyteen. Erityisesti puu- ja paperipohjaiset sekä muut orgaaniset materiaalit ovat erityisen herkkiä homehtumiselle. Parhaiten mikrobivaurioita kestävät lasit, metallit ja uusi alkalinen betoni. Rakennusmateriaalien homeenkestävyyttä voidaan myös parantaa käyttämällä homesuoja-aineita. (6)

Rakennusmateriaalin omien ominaisuuksien lisäksi myös sen puhtaudella ja siihen liittyvillä muilla materiaaleilla on merkitystä. Esimerkiksi hyvin homehtumista kestäväälle kivipinnallekin kerääntyvä orgaaninen lika yhdessä suotuisten lämpö- ja kosteusolosuhteiden kanssa mahdollistaa mikrobikasvuston syntymisen. Betoniseinän homehtumisriskiin vaikuttaa myös olennaisesti käytetty pinnoitusmateriaali. Esimerkiksi vesihöyryntiivis maali yhdessä ulkopuolisen kosteusrasituksen kanssa pitää betonin kosteuspitoisuuden korkeana. Käytetyssä maalissa itsessään saattaa myös olla orgaanisia mikrobeille ravinnoksi kelpaavia ainesosia. (6)

3.5.2 Suolat

Suolojen kerääntyminen rakenteisiin on kivipohjaisissa materiaaleissa yleisin kosteusperäisten vaurioiden aiheuttaja. Veteen liuennot suola kulkeutuu rakenteen sisällä pääasiallisesti kapillaaristen kosteusvirtojen mukana. Rakenteissa liikkuva vesi kuljettaa mukanaan liuenneet suolat haihtumisvyöhykkeeseen, jossa veden haihtuessa sen suolapitoisuus kasvaa ja ylikylläisen liuoksen suolat kiteytyvät paikalleen. Suolat voivat kiteytyä joko materiaalin pinnalle tai sen sisällä oleviin huokosiin. Kiteytyessään suolat tarvitsevat enemmän tilaa kuin veteen liuenneena, minkä johdosta huokosiin kiteytymisen johtaa materiaalin sisällä kohonneeseen huokospaineeseen. Paineen kasvaessa muodostuneet suolakiteet rikkovat huokosten seinämiä ja aiheuttavat näin materiaalin rapautumista. Koska kosteus liikkuu kivipohjaisissa rakenteissa usein kapillaarisesti materiaalin sisällä ja haihtuu lähellä pintaa, ilmenevät kivirakenteiden kosteusongelmat yleensä juuri suolan aiheuttamien näkyvien kiteytymien tai pintavaurioiden perusteella. (1)

Frank Frösselin mukaan suolojen ja kosteuden aiheuttamat materiaalin huokosten vaurioitumistavat eivät kuitenkaan ole vielä täysin selvillä. Nykykäsityksen mukaan vaurioita voivat aiheuttaa joko muodostuneet suolakiteet, jotka laajetessaan painavat huokosten seiniä tai suolakiteiden tukkimiin huokosiin syntyvä kiteiden ja liuoksen yhdessä aiheuttama hydrostaattinen kiteytymispaine. Myös suolojen hydratoitumisen on arvioitu lisäävän huokosiin muodostuvaa painetta. Frösselin mukaan suolat eivät kuitenkaan aiheuta rakenteille vaurioita ilman niitä liikuttavaa kosteutta. (12) Sisäilman kosteuspitoisuuden ja ulkoisten kosteusrasitusten ohella erityisesti nopeiden kosteusolosuhteiden vaihteluiden on todettu kiihdyttävän vaurioiden syntymistä. Suolojen aiheuttamat vauriot vaihtelevat siis kosmeettisista ongelmista aina rakenteita rikkoviin ja mahdollisesti materiaalin lujuutta heikentäviin vaurioihin. (1)

Rakennuksia vaurioittavia suoloja on kemiallisesti erilaisia ja niitä voi kulkeutua rakenteisiin useista eri lähteistä. Ne voivat olla lähtöisin esimerkiksi käytettyjen rakennusmateriaalien raaka-aineista, rakennusta ympäröivästä maaperästä, viemäriverkoston vuotoista tai merestä. Myös rakennuksen lähistöllä käytettävistä jäänpoistoaineista tai lannoitteista saattaa kulkeutua suoloja rakenteisiin esimerkiksi roiske- tai vajovesien mukana. Joissakin tapauksissa suoloja voi myös syntyä rakenteiden sisällä tapahtuvissa kemiallisissa reaktioissa, kun esimerkiksi edellä mainituista lähteistä päättyy rakenteseen suolojen muodostumisen kannalta sopivia ainesosia. (1)

Hygroσκοoppisuutensa johdosta monet suolat imevät vettä myös ympäröivästä ilmasta ja riittävässä kosteuspitoisuudessa liukenevat siihen. Suolojen hygroσκοoppisuus saattaa näin nostaa rakenteen tasapainokosteutta. Suoloja sisältävä materiaali pystyy siis imeämään enemmän kosteutta samassa ilmakehässä kuin puhdas materiaali. Jotkut suolat ovat jopa niin hygroσκοoppisia, että ne imevät vielä liunneenakin ilmakehää itseensä ja näin ollen kastelevat rakenteita lisää. Tällaisissa tilanteissa ei suolojen kiteytymistä seinärakenteen pinnalla ole välttämättä ollenkaan havaittavissa. Joidenkin lähteiden mukaan suolojen hygroσκοoppisesti imemä vesi saattaa näin jopa kiihdyttää veden kapillaarista nousua ja tätä kautta myös suolojen kerääntymistä. Tällaisia itseään kiihdyttäviä prosesseja on havaittu vanhoissa rakenteissa, joissa suola- ja kosteusrasitusten on todettu nousevan pikkuhiljaa korkeammalle. (12)

3.5.3 Pakkasrapautuminen

Materiaalin huokosissa oleva vesi saattaa muodostua vaurioittavaksi tekijäksi myös silloin, kun sen lämpötila laskee riittävästi pakkasen puolelle. Jäättyessään vesi laajenee, mikä lisää materiaalin sisällä olevaa huokospainetta. Jos huokosissa oleva tila ei riitä laajenemiselle, saattaa jään aiheuttama paine rikkoa materiaalin huokosrakennetta. Tästä seuraa materiaalin rapautumista, mikä yleensä johtaa veden kulkeutumiseen syvemmälle rakenteisiin. Pakkasrapautuminen siis voimistaa itseään ja kulkeutuu pikkuhiljaa syvemmälle materiaaliin. Jäätymisen aiheuttama vaurio saattaa tapahtua myös siten, että jäänyt pintakerros estää materiaalin sisälle jääneen veden laajenemisen. Tällainen paine saattaa irrottaa levymäisiä paloja materiaalista tai rappauksesta. (1)

3.6 Rakenteiden kuivuminen

Samaan tapaan kuin rakennusten kastumisessa, on myös kuivumisen osalta olennaisinta rakennuksessa käytetyt rakenneratkaisut ja materiaalit. Kosteusongelmia tyypillisesti esiintyy, jos rakenteisiin päässyt kosteus ei pääse kuivumaan riittävän nopeasti. Toimiva

rakennus pystyy siis itse kuivattamaan itsensä mahdollista kosteuden kertymistä nopeammin. Jotta kuivuminen olisi mahdollista, tulisi rakennukseen kerääntyvälle kosteudelle olla olemassa reitti johonkin ilmatilaan, josta se pääsee haihtumaan pois vaurioittamatta rakenteita. Tästä syystä nykyrakennukset rakennetaan tyypillisesti siten, että vaiipan materiaalikerrosten vesihöyrynvastukset pienenevät kohti tuuletusrakoa. Vanhemmissa, esimerkiksi massiivitiilirakenteissa, rakennuksen kuivumiskyky perustuu riittävän vesitiiviiseen, mutta diffuusioavoimeen ulkopintaan. Tällaisen pintamateriaalin toiminta perustuu siihen, että se ehkäisee sadeveden pääsyä rakenteisiin, mutta päästää sisältä tulevan kosteuden haihtumaan ulospäin. (9)

Mahdollisista vuodoista tai rakennusvirheistä johtuvat rakenteiden kastumiset vaativat yleensä korjaavia toimenpiteitä. Jotta toimenpiteistä olisi hyötyä, on kosteudenlähteen alkuperän selvittäminen avainasemassa korjausta suunniteltaessa. Yleensä korjaustoimenpiteillä pyritään korjaamaan kosteuden aiheuttamat vauriot ja poistamaan kosteudenlähde tai ainakin estämään sen aiheuttamat ongelmat tulevaisuudessa. Usein erityisesti vesivuodoista aiheutuneet vauriot vaativat myös erillisen kuivatuksen. Kuivatus voidaan järjestää lämmittämällä joko ilmaa tai rakenteita. Molemmissa tapauksissa on lämmityksen lisäksi huolehdittava myös riittävästä ilmanvaihdosta, jotta kostea ilma pääsee poistumaan tiloista. Tyypillisin esimerkki rakenteita kuivattavasta lämmityksestä on kylpyhuoneen lattialämmitys.

4 Temperierung

4.1 Johdanto / Historia

Nykytiedon mukaan sekä lattia- että seinälämmityksen juuret ovat antiikin Kreikassa ja Roomassa kehitetyssä Hypocaust-keskuslämmitysjärjestelmässä. Sen periaatteena oli johtaa lämmintä ilmaa lattian alla ja seinärakenteissa oleviin onkaloihin. Näin muodostuneet lämpimät rakenteet loivat viihtyisän sisäilmaston sekä muun muassa mahdollistivat Roomalaisissa kylpylöissä tyypilliset veden korkeat lämpötilat ilman kondensaatio-riskiä ympäröiviin rakenteisiin. (21) Antiikkisen menetelmän pohjalta on myöhemmin kehitetty ilmakierron rinnalle myös vesikiertoon ja sähköön perustuvia rakenteiden sisäisiä lämmitystapoja, joista nykypäivänä tunnetuin lienee lattialämmitys.

Vaikka tavanomainen seinälämmitys patentoitiin Britanniassa jo 1909 (22), pidetään tässä diplomityössä esiteltävän yksinkertaistetun seinän alareunaan asennettavan temperierung-lämmityspotkijärjestelmän kehittäjänä saksalaista Henning Großeschmidtä (23). Großeschmidt kehitti menetelmää Baijerin osavaltiossa 1980-luvulta alkaen erityisesti museoiden ja muiden näyttelytilojen ilmastohallintaa silmällä pitäen. Sen jälkeen temperierung-menetelmän käyttöä on tutkittu ja sovellettu myös puhtaasti lämmitys- tai kosteudenhallintajärjestelmänä. Menetelmän selkeä määrittäminen ja standardisointi ovat kuitenkin vieläkin tekemättä (22), minkä johdosta sillä on lukuisia erilaisia nimityksiä ja vaihtelevia toteutustapoja. Temperierung-menetelmän ja seinälämmityksen ero on usein häilyvä, kuten voi huomata tämän diplomityön koejärjestelyiden toteutuksesta.

Keski-Euroopassa laajemmalle käytölle levinnyt temperierung-menetelmä on vielä suhteellisen tuntematon Suomessa. Maantieteellisesti lähin tiedossa oleva kyseistä menetelmää koskeva tutkimus löytyy Ruotsista vuodelta 2004 (24), missä menetelmän energiatehokkuutta mitattiin ja vertailtiin vastaavaan patterilämmitysjärjestelmään. Ruotsissa temperierung-menetelmä ei tutkimuksen myönteisistä tuloksista huolimatta ole saanut sen suurempaa huomiota. Aihetta tutkinut Holmberg pitää osasyynä vähäiseen huomioon Ruotsissa vallitsevaa pelkoa rakenteiden sisällä kulkevia vesikiertoisia putkia kohtaan (25).

Suomessa vastaavantyyppistä seinärakenteen lämmittämistä kosteusongelmien ehkäisemiseksi on kokeiltu ainakin Seinäjoella, Helsingin rautatieasemalla ja Suomenlinnassa. Seinäjoen Lakeuden Ristin kirkossa vesikiertoisia lämmityspotkia asennettiin kylmän kellotornin seinien sisäpintaan. Kirkkohallituksen yliarkkitehdin Antti Pihkalan mukaan (26) ”omalaatuista temperierung-menetelmää soveltavaa kokeilua” käytettiin tornin pintamateriaalien irtoilun ehkäisemiseksi positiivisin tuloksin. Suomenlinnassa menetelmää on kokeiltu sähkökäyttöisenä kahdessa kohteessa vaurioituneiden massiivitiiliseinien kosteusongelmien korjaamiseen (27). Myös Helsingin rautatieaseman kellotornin luonnonkivijulkisivun kosteusongelmien korjaamiseen on käytetty lämpövastuskaapeleita yhdessä rakenteiden sisälle asennetun tuuletuskanaviston kanssa. Korjauksen lopputuloksena rakenteen kosteuskertymä on kääntynyt laskuun (28).

Temperierung-menetelmän asennukset Suomessa ovat kuitenkin jääneet lähinnä yksittäisiksi kokeiluiksi, eikä suomenkielistä kirjallisuutta aiheesta ole muutamia lyhyitä artikkeleita lukuun ottamatta saatavilla. Myös suomenkielinen termi menetelmälle on vielä keksimättä, minkä johdosta tämän työn yhteydessä pysytäänkin saksankielisessä

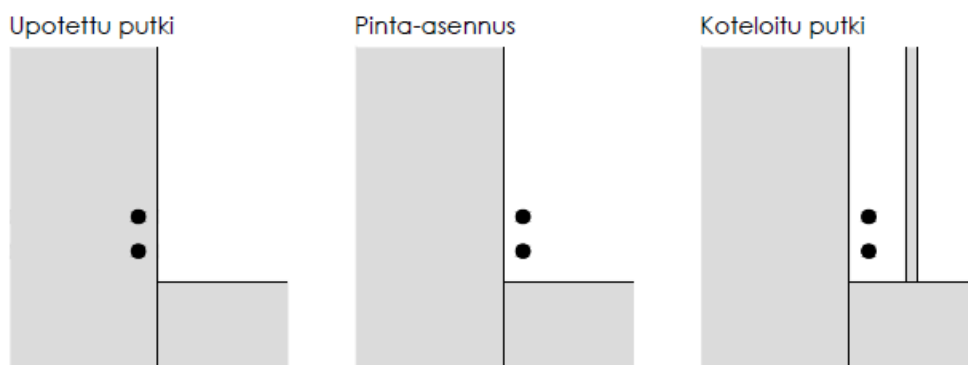
temperierung-termissä. Kohdennettu seinälämmitys voisi kuitenkin olla menetelmää kuvaavin suomenkielinen termi.

Osasyynä menetelmän hitaaseen leviämiseen pohjoismaihin voi olla myös meneillään oleva debatti sen energiankulutuksesta lämmitysjärjestelmänä. Temperierung-menetelmän parissa työskennelleet tutkijat jakautuvat selvästi kahteen leiriin, joista toinen pitää sitä energiaa tuhlaavana ja toinen säästävänä. Energiankulutuskysymyksessä vallitsevista erimielisyyksistä huolimatta valtaosa asiaan perehtyneistä on yksimielisiä temperierung-menetelmän rakenteita kuivattavasta vaikutuksesta ja näin ollen sen kyvystä toimia kosteusongelmaisten rakennusten restaurointimenetelmänä. Vaikka alun perin menetelmä kehitettiin erityisesti historiallisten rakennusten restaurointiin, soveltuu se monien tutkijoiden mukaan lämmitysjärjestelmäksi myös nykyaikaisiin asuinrakennuksiin.

4.2 Menetelmän kuvaus

Temperierung-menetelmässä asennetaan ulkoseinien alaosiin tai ikkunoiden alapuolelle vesikiertoisia lämmitysputkia tai sähköisiä lämmityskaapeleita, jotka sekä lämmittävät että kuivattavat rakennetta. Tyypillisesti kaksi lämmitysputkilinjaa (vesikiertoisessa järjestelmässä tulo ja poisto) asennetaan yleensä kivirakenteisten seinien sisäpuolelle rappauksen tai mahdollisesti betonin sisälle, jolloin lämpö siirtyy rakenteisiin pääasiassa konduktion välityksellä. Joissakin tapauksissa temperierung-menetelmää on toteutettu myös seinän pintaan tai erillisen kotelon sisälle asennetuilla putkilla. Temperierung eroaa perinteisestä koko seinän kattavasta seinälämmityksestä muodostamalla seinän pituussuuntaisen viivamaisen lämmityksen. Monta vierekkäin asennettua lämmityskaapelia muodostaisivat siis tavalliseen seinälämmitykseen verrattavan lämmönlähteen.

Vesikiertoisessa temperierung-lämmityksessä käytettävät tulo- ja poistolinjat ovat yleensä samaa jatkuvaa lämmitysputkea, joka kulkee seinän alareunaa pitkin ja kääntyy seinälinjan päätyttyä takaisin kuljettaen matkan aikana jäähtyneen veden lähtöpisteeseen. Ideana on lämmittää seinärakennetta huoneilman sijasta ja näin ollen ikään kuin eristää huoneen sisäilmasto ulkoilmasta sekä ehkäistä kylmän seinän aiheuttamia kosteusongelmia. Lämmitystä pidetään tavallisesti päällä kellaritiloissa vuoden ympäri ja mahdollisissa muissa rakenteissa vain lämmityskaudella. Kesäajaksi kellarin lämmitys on kuitenkin hyvä kytkeä pienemmälle teholle liiallisen kuumenemisen ehkäisemiseksi. Menetelmän etuja ovat muun muassa huoneen lämpötilan tasoittuminen, sisäilman konvektiovirtausten eliminointi ja ylimääräisen kosteuden poistaminen sekä rakenteista että ilmasta. (23)



Kuva 8. Erilaisia Temperierung-menetelmän toteutustapoja. (29)

Temperierung-menetelmän toteutustavat voidaan jakaa kolmeen pääryhmään, jotka jakautuvat kukin omiin eri alaryhmiin. Jako toteutuu kuvassa 8 esitettyjen lämmitysputkien tai -kaapeleiden erilaisten asennustapojen perusteella. Vesikiertoiset putket voidaan siis asentaa joko rakenteen sisälle, pinnalle tai erillisen kotelon sisälle. Lämmityskaapeleiden asennus on suositeltavaa toteuttaa vain rakenteen sisälle upotettuna. Käytettävän toteutustavan valintaan vaikuttavat muun muassa haluttu rakennusfysikaalinen toimintatapa, seinän materiaali sekä ulkonäköseikat.

Lämmitysputkien upottaminen rakenteen sisälle lienee toteutustavoista yleisimmin käytetty ja Großeschmidtin mukaan myös optimaalisin (29). Vaikka kyseinen toteutustapa vaatii lieviä rakenteita rikkovia toimenpiteitä, mahdollistaa se kuitenkin lämmön johtumisen lämmitysputkesta suoraan rakenteisiin ilman eristävää ilmakerrosta välissä. Putkien upottamisen toteuttaminen riippuu olennaisesti seinän materiaalista. Esimerkiksi tiiliseinässä putket voidaan upottaa joko tiilien väliseen laastikerrokseen tai niitä peittävän rappauksen sisälle. Betoniseinässä putket voidaan upottaa sitä varten erikseen sahattuun loveen tai vaihtoehtoisesti peittää seinän pinnan tasosta ulkonevalla laastista tehdyllä kynnyksellä.

Toinen suhteellisen yleinen toteutustapa on lämmitysputkien asentaminen näkyviin seinän pinnalle. Tämä voidaan toteuttaa joko seinän pintaan kontaktissa olevalla asennuksella tai jättämällä ilmarako lämmitysputken ja seinän pinnan välille. Asennustavalla voidaan vaikuttaa siihen, miten lämpö siirtyy putkesta rakenteisiin ja huoneilmaan. Myös seinän pintaan asennetun putken kontaktin tiiveydellä on vaikutusta. Osittain laastiin upotettu tiivis kontakti johtaa enemmän lämpöä seinään kuin tiivistämätön kontakti.

Kolmas tapa toteuttaa temperierung-lämmitysjärjestelmä on asentaa putket seinärakenteen päälle levytyksellä tehtävän kotelon sisälle. Näin lämmitysputket ovat siis irti itse seinärakenteesta, mutta silti piilossa erillisessä ilmatilassa seinän pinnan takana. Tällä menetelmällä lämpö leviää pääasiallisesti säteilemällä ja konvektiovirtausten välityksellä kotelon sisäisessä ilmatilassa. Tämä erillisen levypinnan taakse tehty temperierung-systeemi ei Bichlmaierin mukaan kuitenkaan ole enää paljoa käytössä (29). Syitä tähän ovat muun muassa uuden seinän tuomat lisäkustannukset ja tilaa pienentävä vaikutus sekä vanhan seinäpinnan piiloon jääminen. Usein varsinkin vanhat rakennukset ja niiden pinnat halutaan entisöidä nimenomaan alkuperäisen näköisiksi.

Menetelmän toteutustavasta riippumatta temperierungin pääasiallisena tavoitteena on luoda miellyttävä sisäilmasto sekä lämmitysjärjestelmänä että rakenteiden kuivattajana ehkäisten muun muassa homeen kasvun riskiä rakenteissa. Saksalaisessa kirjallisuudessa on ollut erityisesti esillä menetelmän kehittäminen museoiden ja muiden historiallisten rakennusten sisäilmaston hallintaan sekä ihmisiä että näyttelyesineitä silmällä pitäen. Historialliset rakennukset ovat yleensä muutenkin soveltuvia menetelmän käytölle massiivisten rakenteidensa puolesta.

Nykyaikaisissa kevyemmissä rakennuksissa temperierung-menetelmää voidaan hyödyntää erityisesti maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmien hallintaan. Großeschmidtin (21) mukaan maanvastaisten seinärakenteen lämmittämisen yhteydessä seinät eivät tarvitse erillistä höyrynsulkua tai lämmöneristettä. Tämä mahdollistaisi temperierung-menetelmän käytön sellaisenaan monien maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmien korjaamiseen ilman suurempia rakenteita rikkovia toimenpiteitä. Jokainen kohde tulee kuitenkin arvioida tapauskohtaisesti menetelmän soveltuvuuden kannalta.

4.3 Fysikaaliset perusteet

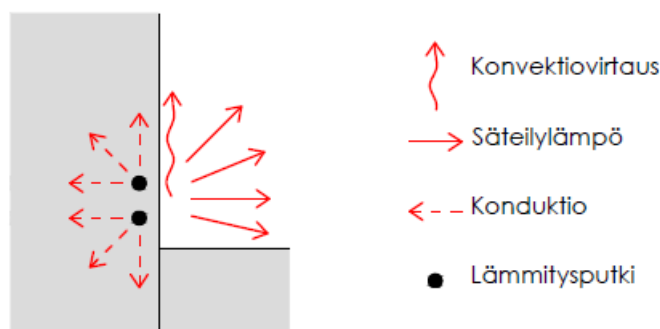
Temperierung-menetelmässä lämpö siirtyy rakenteisiin ja huoneilmaan aina sekä konduktion, konvektion että säteilyn välityksellä. Edellisessä luvussa esitellyistä menetelmän toteutustavoista riippuu, mikä tai mitkä lämmönsiirtymistavoista ovat hallitsevia. Tapauksesta riippuen jokin siirtymistapa voi myös jäädä häviävän pieneksi.

Kaikille temperierung-menetelmän toteutustavoille ominaista on seinään muodostuva yksi tai useampi lämmin kaistale, joka säteilee lämpöä huoneeseen. Säteilyn lisäksi lämpöenergiaa siirtyy seinämateriaalissa johtumalla eri suuntiin ja lämpimän seinän vieressä olevan ilmassan konvektiovirtausten mukana ylöspäin. Großesmidtin (21) mukaan nämä pienet konvektiovirtaukset ovat kuitenkin ihmisten kokemien sisäilmasto-olosuhteiden kannalta merkityksettömiä.

Osa lämpöenergiasta siirtyy johtumalla seinän läpi suoraan ulkoilmaan, mikä saattaa seinän paksuudesta ja materiaaleista riippuen aiheuttaa huomattaviakin energiahäviöitä. Seinään johtuva lämpöenergia kuitenkin myös kuivattaa rakenteita, mikä puolestaan parantaa seinän lämmöneristävyyttä. Kuivumisen vaikutus materiaalien lämmönjohtavuuteen on merkittävä erityisesti hygroskooppisilla materiaaleilla (10) ja kun liikutaan kapillaarisen veden kyllästämällä alueella. Kleinmanns (30) arvioi 1 %:n kuivumisen vaikutuksen lämmöneristävyyteen olevan 10 %:n luokkaa. Tämä luku on suuntaa antava ja vaihtelee huomattavasti riippuen seinän rakenteesta ja materiaaleista. Lämmönjohtavuuden pienentyminen perustuu kosteuden haihtumiseen materiaalin huokosista, jolloin eristävän ilmamäärän osuus materiaalista kasvaa. Näin ollen materiaalin kosteuden vaikutus sen lämmöneristävyyteen riippuu olennaisesti kyseisen materiaalin ominaisuuksista, kuten vesihöyrynläpäisevyydestä, tiheydestä ja huokosrakenteesta.

4.3.1 Upotettu putki

Seinämateriaalin sisälle upotetun lämmityspotken tai -kaapelin tapauksessa lämpöenergia siirtyy seinärakenteisiin vain konduktion välityksellä. Homogeenisessa seinämateriaalissa energiaa johtuu kaikkiin suuntiin, jolloin putken ympärille syntyy muuta rakennetta selvästi lämpimämpi vyöhyke. Tässä vyöhykkeessä lämmennyt seinän sisäpinta säteilee lämpöenergiaa seinärakennetta viileämpään huonetilaan. Seinästä siirtyy lämpöä myös konduktion välityksellä seinän pinnalla olevaan ilmassaan ja leviää hitaan yksidimensioisen konvektiovirtauksen mukana ylöspäin. Coanda-ilmiön johdosta konvektiovirtaus pysyy seinän pinnalla ja levittää lämpöenergiaa koko yläpuolisen seinän pinta-alalle (21). Seinän vierustalla kohoavan ilman lämpötilan nousu johtaa myös sen suhteellisen kosteuspitoisuuden alenemiseen. Näin ollen seinän pinnalla virtaa lämmintä ja kuivaa ilmaa, mikä vahvistaa diffuusiota kostean seinän ja kuivan ilmassan välillä. Näin seinärakenteet kuivuvat konduktion lämmittävän vaikutuksen lisäksi myös konvektiovirtauksen avulla. Mallinnettaessa temperierung-menetelmällä lämmitettyä seinärakennetta esimerkiksi WUFI® 2D -ohjelmalla, on pidettävä mielessä, ettei ohjelma ota huomioon konvektiovirtausten aiheuttamaa lämmön jakautumista.



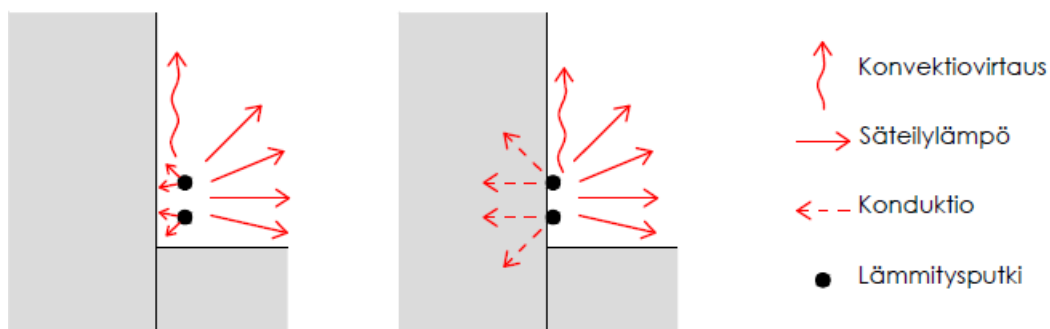
Kuva 9. Seinään upotetun temperierung-menetelmän periaatepiirros.

Upotetun putken etuja ovat muun muassa konvektiovirtausten minimointi sekä suhteellisen tasainen sisäilmasto. Konvektiovirtausten minimointi perustuu suuren pinta-alan ja massan hyödyntämiseen huoneen lämmönlähteenä, kun lämmitys tapahtuu välillisesti seinärakenteen kautta. Huonetilassa ei siis ole paikallisia kuivia ja kuumia mikroilmastoja muodostavia erillisiä lämmittimiä, jotka saattaisivat toimia myös pölynkerääjinä. Lämmityspotkien sijainnilla rakenteen sisällä on myös lämpötilan vaihteluita tasoittava vaikutus, kun lämpö leviää puskurina toimivan seinämateriaalin kautta. Erityisesti massiivirakenteisissa seinissä rakenteen massan varaavuus korostuu.

Koska suuri osa lämpöenergiasta siirtyy huoneeseen seinän lämpimän pinnan aiheuttaman säteilyn vaikutuksesta, on koettu operatiivinen lämpötila suurempi, kuin mitattu ilman lämpötila. Tämä mahdollistaa sisäilman lämpötilan pienentämisen ilman, että asukkaiden lämpöviihtyvyys huononee. Rakenteiden kautta ohjautuvaa säteilylämpöä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi puolilämpimissä tai ulkona sijaitsevista tiloista. Kleinmanns (30) mainitsee ulkoilmamuseot esimerkkinä tällaisista kohteista.

4.3.2 Seinän pinnalla oleva putki

Seinän pinnalle näkyviin asennettu putki muistuttaa toimintaperiaatteeltaan hieman enemmän perinteistä patterilämmitystä. Erityisesti kokonaan irti seinästä oleva lämmityspotki jakaa lämmön käytännössä pelkästään konvektion ja säteilyn välityksellä. Lämpösäteilyn johdosta seinärakenteeseen lämmityspotken kohdalle muodostuu tässäkin tapauksessa lämmin kaistale, joka johtuu myös syvemmälle seinän sisälle. Kyseinen asennustapa kuitenkin mahdollistaa suurempien konvektiovirtausten sekä lämpimän ja kuivan mikroilmaston syntymisen putken ympärille.



Kuva 10. Seinän pinnalle asennetun temperierung-järjestelmän periaatepiirros. Vasemmalla irti ja oikealla kiinni seinässä.

Osittain seinän pintaan kiinni asennettuna mukaan tulee edellä mainittujen lämmönsiirtymistapojen lisäksi myös suoraan seinärakenteisiin johtuva lämpövirta. Johtumalla

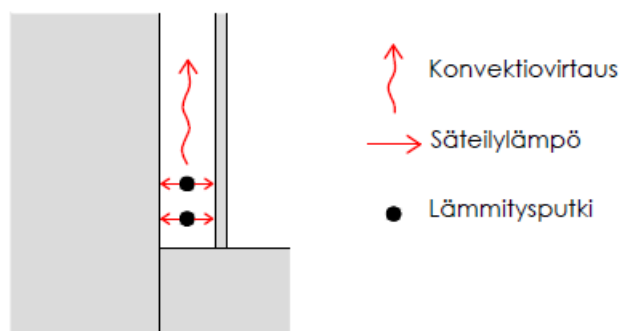
siirtyvän lämpöenergian suuruus riippuu olennaisesti asennustavasta sekä putken ja seinän välisen kosketuspinnan suuruudesta. Laastiin upottaminen mahdollistaa huomattavasti suuremman lämmön johtumisen suoraan seinärakenteeseen. Silloin seinän epätaisuuksien aiheuttamat epäjatkuvuudet minimoidaan ja kosketuspintaa putken pyöreän muodon kanssa lisätään.

Koska seinän pinnalle asennettavalla lämmitysputkella lämpösäteily on olennaisin lämmönsiirtokeino, on sen pintamateriaalilla suuri vaikutus lämmönjakeluun. Syntyvän lämpösäteilyn voimakkuus riippuu siis materiaalista, joka toimii säteilevänä pintana. Paljaan kupariputken emissiivisyys on sen puhtaudesta riippuen luokkaa 0,05 - 0,15. Lämpösäteilyn kannalta on siis paljon tehokkaampaa pinnoittaa putki esimerkiksi maa-laamalla tai lakkaamalla, jolloin emissiivisyyttä voidaan nostaa arvoihin 0,93 - 0,96.

4.3.3 Kotelon sisällä oleva putki

Kotelon sisälle asennettava temperierung-järjestelmä luo erillisen lämmintä ilmaa sisältävän ilmaraon näkyvillä olevan seinäpinnan taakse. Kotelon alareunassa sijaitsevan putken lämpöenergia leviää sen aiheuttamien konvektiovirtausten mukana seinärakenteen ja koteloiivan levypinnan väliin. Säteilevä lämpö myös lämmittää kotelon seiniä erityisesti putkea lähimpänä sijaitsevilla pinnoilla, missä säteilyn intensiteetti on korkein. Joissakin tapauksissa voi olla suositeltavaa pinnoittaa putkea lähimmät pinnat esimerkiksi alumiinipaperilla liiallisen kuumenemisen ehkäisemiseksi.

Kotelorakenteella toteutettu temperierung-menetelmä jakaa seinän alareunaan asennettujen lämmitysputkien energian tehokkaimmin koko seinän pinta-alalle. Toisaalta kotelo myös eristää lämmönlähdettä sisätiloista enemmän kuin edellä mainitut muut toteutustavat. Kotelon sisälle asennetun temperierung-järjestelmän miinuspuolena voidaan pitää myös sen tilaa vievää vaikutusta, kun seinärakenteen pintoja joudutaan siirtämään sisätiloihin päin. Edellä mainituista syistä johtuen tämänkaltaisen temperierung-menetelmä on jäänyt pienimmälle käytölle.



Kuva 11. Kotelon sisälle asennetun temperierung-järjestelmän periaatepiirros.

4.4 Käyttötavat

4.4.1 Yleistä

Vaikka temperierung-menetelmä kehitettiin alun perin museoiden lämmitysjärjestelmäksi, on sen soveltuvuus huomattu myös tavanomaisen korjausrakentamisen puolella. Menetelmän kehittäjän Henning Großschmidtin mukaan temperierungia voidaan käyttää korjausmenetelmänä, joka yhdistää kosteudenhallinnan, lämmityksen ja sisäilmastonhallinnan yhdeksi yksinkertaistetuksi kokonaisuudeksi (21). Tämä

tarkoittaa käytännössä siis sitä, että käytettäessä temperierung-menetelmää esimerkiksi kellarin maanvastaisten seinien kosteusongelmien korjaamiseen, tulee rakennusta lämmittävä vaikutus joka tapauksessa sivutuotteena. Jos taas menetelmää käytetään ensisijaisesti lämmitysjärjestelmänä, paranee sivuvaikutuksena rakenteiden kyky kestää kosteuden aiheuttamia ongelmia. Temperierungin käyttäminen lämmitysjärjestelmänä jättää myös ilmanvaihdolle liikkumavaraa, sillä lämpö varastoituu rakenteisiin huoneilman sijasta. Tällöin ilmanvaihdon mukana poistuvan lämpöenergian määrä vähenee. Myös auki olevien ovien ja ikkunoiden vaikutus lämpöhäviöihin vähenee.

4.4.2 Kosteudenhallinta

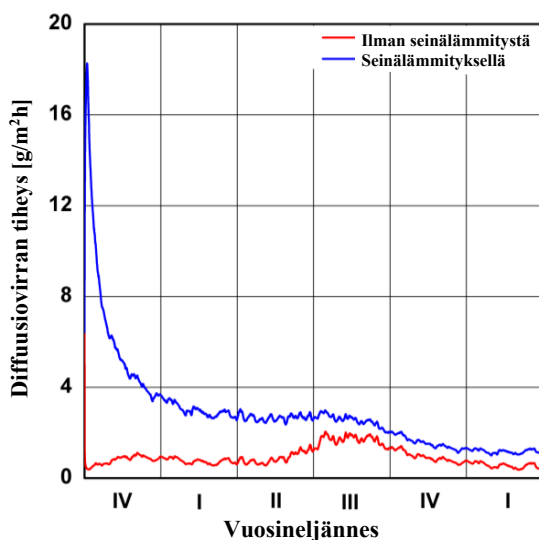
Etenkin maanvastaisten rakenteet ovat jatkuvasti suuren kosteusrasituksen kohteena. Muun muassa pohjaveden, sadeveden ja sulamisveden aiheuttamia kosteusvaurioita on perinteisesti pyritty ehkäisemään maanpinnan kallistuksilla, salaojilla ja vedeneristyksillä. Maaperän huokosissa vallitsee käytännössä aina lähes 100 % suhteellinen kosteuspitoisuus, minkä johdosta kostea huokosilma pyrkii jatkuvasti maanvastaisten rakenteiden läpi kuivempaan huoneilmaan. Diffuusion vaikutus korostuu erityisesti kellareiden lattioissa ja maanvastaisten seinien alaosissa, missä kostean maaperän lämpötila nousee lähelle sisäilman lämpötilaa (9). Myös maanpäälliset seinärakenteet voivat altistua haitallisille kosteusrasituksille esimerkiksi ulkopuolisen viistosateen tai sisäpuolisen ilman korkean kosteuspitoisuuden johdosta.

Lämmitysputkien tai -kaapeleiden käyttäminen kosteudenhallintamenetelmänä perustuu rakenteiden kuivumiskyvyn parantamiseen lämmittämällä. Korkeampaan lämpötilaan nostettu materiaalin sisäinen huokosilma pystyy sitomaan itseensä enemmän kosteutta, jolloin nestemäiset vesimolekyylit haihtuvat rakenteista huokosiin. Myös lämpimän seinärakenteen pinnassa olevan ilman suhteellinen kosteus laskee lämpenemisen johdosta, jolloin vesihöyryn diffuusiiovirtaus rakenteesta ulospäin voimistuu. Pysyvästi asennettuna ja oikein mitoitettuna temperierung-lämmitysputkijärjestelmä myös pitää rakenteet kuivina, ellei uusia merkittävämpiä kosteuslähteitä ilmaannu. Lämpimänä pidetty seinän sisäpinta myös ehkäisee kondensoitumisesta aiheutuvia kosteusongelmia ja näin ollen estää mikrobien kasvamista rakenteiden pinnoilla.

Seuraavassa kappaleessa esitellään temperierung-menetelmän toiminta kapillaarikatkona. Tämän työn mallinnusten mukaan pelkästään seinän alareunaan asennetut lämmitysputket toimivat useissa tapauksissa tehokkaana kapillaarikatkona, mutta eivät välttämättä ehkäise muista syistä suoraan seinän läpi horisontaalisesti siirtyvää kosteutta. Laajempialaisille kosteusongelmille voidaan kehittää ratkaisuja jakamalla lämpöä tasaisemmin koko seinän alalle tavanomaisen seinälämmityksen tapaan. Esimerkiksi menoputken mennessä seinän alareunassa voidaan paluuputki asentaa seinän keskivaiheille, mikä jakaa lämpöenergiaa ja näin ollen lämmittää sekä kuivattaa seinää laajemmalla alueella. Edellä mainituista syistä kosteudenlähteen perusteellinen selvittäminen helpottaa huomattavasti temperierung-korjauksen suunnitteluprosessia.

Maanvastaisia rakenteita lämmitettäessä tapahtuu niiden kuivuminen pääasiallisesti sisäilmaan päin, minkä johdosta käytettävien sisäpuolisten pinnoitteiden käyttöön onkin kiinnitettävä erityistä huomiota. Jotta kuivuminen tapahtuisi tehokkaasti, on suositeltavaa käyttää pienen vesihöyrynvastuksen omaavia hengittäviä pinnoitemateriaaleja. Eri-tyisen pahasti kastuneissa rakenteissa voi myös olla suositeltavaa jättää seinän sisäpinta kokonaan pinnoittamatta ensimmäisten lämmityskuukausien ajaksi. Kuvassa 12 on havainnollistettu temperierung-menetelmän vaikutusta rakenteista sisätiloihin suuntautu-

vaan kosteusvirtaan. Kyseessä on todellisesta tilanteesta tehty mallinnus WUFI® 2D -ohjelmalla, joten sitä voidaan pitää suuntaa antavana. Mallinnusten perusteella kosteusvirta sisätiloihin kasvaa huomattavasti varsinkin alkuvaiheessa, mikä viittaa kostean rakenteen nopeaan kuivumiseen.



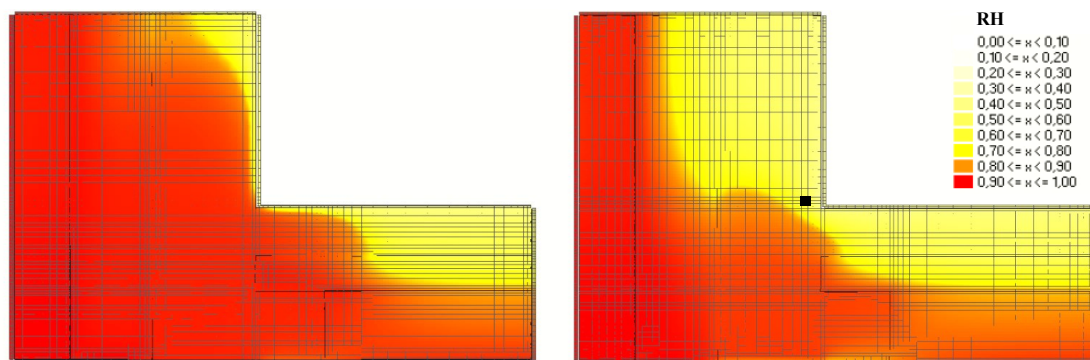
Kuva 12. Diffuusiovirran voimakkuus sisätiloihin käytettäessä temperierung-menetelmää kapillaarikatkona eräässä saksalaisessa tutkimuskohteessa. Sininen viiva kuvaa lämmitettyä rakennetta ja punainen lämmittämätöntä. (31)

Lämmitetyssä vyöhykkeessä haihtuva kosteus kulkeutuu siis voimistuneen diffuusion vaikutuksesta huoneilmaan ja siitä ilmanvaihdon mukana ulos. Tämän johdosta on kiinnitettävä huomiota pintamateriaalien lisäksi myös huonetilan ilmanvaihtoon erityisesti kuivatuksen alkuvaiheessa. Veden haihduttamiseen rakenteista kuluu myös energiaa, mikä näkyy joko vaadittavana lämmitysputkien lisätehona tai hillitympänä rakenteiden lämpötilan nousuna kuivumisvaiheessa. Veden höyrystymislämpö 2260 kJ/kg on siis suoraan pois lämmityskaapeleiden tai -putkien rakenteita lämmittävästä vaikutuksesta. Vaikutus lämpövirtoihin on suoraan riippuvainen haihtuvan veden määrästä rakenteen sisällä.

4.4.2.1 Kapillaarikatko

Kuten aikaisemmin todettiin, mahdollistaa temperierung-menetelmän paikallinen kuivattava vaikutus sen käyttämisen myös eräänlaisena kevytrakenteisena kapillaarikatkona. Tässä tapauksessa kapillaarikatko-nimitystä käytetään, vaikka menetelmä ei muodostakaan fyysistä kapillaarisen kosteusvirran katkaisevaa kerrosta. Tätä voidaan perustella sillä, että oikein mitoitetuilla lämmitysputkilla voidaan estää kapillaarisen veden pääsy nestemäisessä muodossa halutun vyöhykkeen läpi.

Viivamainen lämmin kaista seinän alareunassa siirtää kapillaarisen veden haihtumisen seinärakenteen pystysuoralta pinnalta syvemmälle seinän sisälle vaakasuoraksi haihtumisrintamaksi. Jos kosteus nousee esimerkiksi maanvastaista tiiliseinää pitkin maape-
rällä seinän pinnalle, voidaan kapillaarinen kosteusvirta haihduttaa lämmittämällä jo seinän alareunassa ja sen sisällä. Haihtunut vesihöyry poistuu rakenteesta diffuusion välityksellä ja näin ollen lämmitetyn kaistan yläpuolisen osan kosteuspiitoisuus laskee. Näin luotu kapillaarikatko siis eristää kuvan 13 mukaisesti kuivan rakenteen mörästä ilman fyysistä kapillaarikatkokerrosta. Toimintaperiaatteensa johdosta rakenteiden lämmittämällä ei pystytä estämään paineellisen veden tunkeutumista rakenteisiin.



Kuva 13. Temperierung-lämmitysputkella (10 W/m) muodostettu kapillaarikatko betonisandwich-seinässä. Vasemmalla ilman lämmitystä ja oikealla lähes tasapainotila lämmitysputkien asentamisen jälkeen. Lisätietoja mallinnuksesta ja rakenneleikkaus kappaleessa 5.3.

Kapillaarikatkona toimiessaan temperierung-menetelmä ei siis poista rakennukseen suuntautuvaa kosteusvirtaa vaan pikemminkin voimistaa sitä, kuten edellisen kappaleen kuva 12 osoittaa. Syy voimistuneeseen kosteusvirtaan on lämmityksen muodostamassa haihtumisvyöhykkeessä, jossa kuivan ja märän materiaalin välinen kosteusero suurenee, jolloin kosteutta kapillaarisesti vetävä voima kasvaa (31).

Temperierung-menetelmää kapillaarikatkona käytettäessä on myös huomioitava, ettei kyseinen menetelmä katkaise mahdollisten haitallisten epäpuhtauksien pääsyä sisäilmaan. Tämä voi olla ongelmallista esimerkiksi sellaisissa tilanteissa, missä syvemmällä rakenteessa, lämmitysjärjestelmän asennuksen jälkeen märäksi jäävällä vyöhykkeellä, on homehtuvaa orgaanista materiaalia. Jos tällaisessa tilanteessa rakenne ei ole valmiiksi tiivis, pääsevät homehtumisen aiheuttamat epäpuhtaudet mahdollisesti vaikuttamaan sisäilman laatuun lämmityksestä huolimatta.

4.4.2.2 Temperierung ja suolat

Koska rakenteiden lämmittäminen ei katkaise kosteusvirtaa, ei se myöskään poista mahdollisten suolojen kulkeutumista kapillaarisen kosteuden mukana. Temperierung-lämmitys siirtää suolojen kiteytymisen rakenteen sisällä sijaitsevaan haihtumisvyöhykkeeseen, mikä saattaa joissakin tapauksissa muodostua ongelmaksi. Temperierung-menetelmän ja suolojen yhteisvaikutuksesta ja niiden aiheuttamista mahdollisista vaurioista ei kuitenkaan ole paljoakaan tutkimustietoa saatavilla. Myöskään tämän diplomityön puitteissa ei ole mahdollista tutkia suolojen vaikutuksia muuten, kuin jo olemassa olevan kirjallisuuden perusteella.

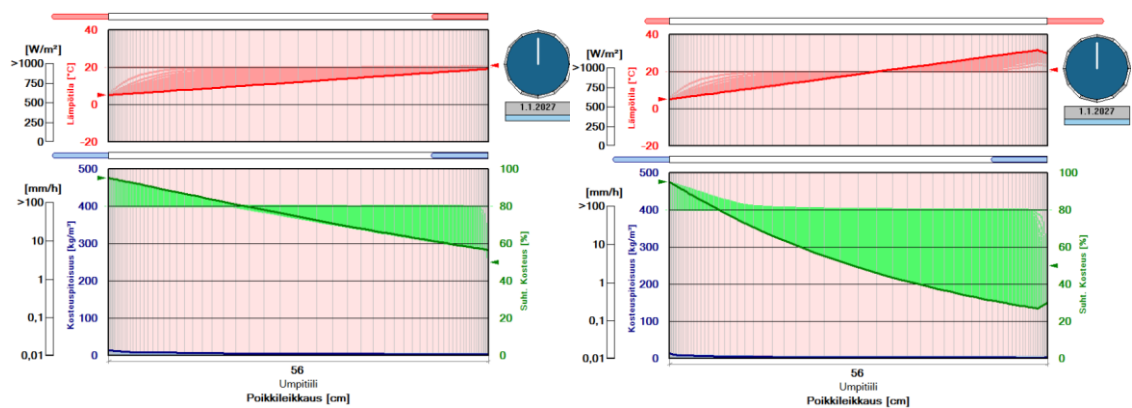
Suolojen käyttäytyminen rakenteessa on hyvin kohdekohtainen prosessi. Temperierung-menetelmän käyttäjäkokemusten perusteella suolojen aiheuttamista ongelmista on saatu hyvin vaihtelevia tuloksia. Joissakin tapauksissa suolojen aiheuttamat ongelmat ovat lisääntyneet, kun toisissa ne ovat poistuneet kokonaan (31, 32, 33). Suolojen kulkeutumiseen vaikuttavat arvioiden mukaan ainakin lämmönlähteen toteutus ja teho, seinän vesi- ja suolapitoisuudet, sisä- ja ulkopuoliset ilmasto-olosuhteet sekä rakenteissa ja maaperässä olevien suolojen tyypit (33). Suomen maaperässä on kuitenkin todettu olevan suhteellisen vähän suoloja, mikä vähentää myös temperierung-menetelmän aiheuttamia riskejä suolojen suhteen. Suurimmat suolarasitukset suomalaisille rakennuksille johtuvat monissa tapauksissa joko rakennuksen käytöstä tai meren läheisyydestä. (1) Käytettäessä menetelmää on kuitenkin hyvä pitää mielessä suolojen kerääntymisen mahdollisuus haihtumisvyöhykkeeseen.

4.4.2.3 Kohdennettu kuivanapitolämmitys

Edellä mainittujen lisäksi menetelmää voidaan hyödyntää myös rakennuksen vaipan kriittisimpien kohtien kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseen. Kriittisiä kohtia voivat olla esimerkiksi rakennuksen nurkat tai rakenteelliset kylmäsilat. Ohuissa ja huonosti eristetyissä seinärakenteissa lämmittämällä voidaan myös ehkäistä sisäpuolista kosteuden kondensoitumista kylmään seinään sekä ulkopuolista jäätyksen aiheuttamaa pintamateriaalin rapautumista.

4.4.3 Lämmitysjärjestelmä

Temperierung-menetelmän käyttäminen lämmitysjärjestelmänä perustuu sisäilmaston ikään kuin eristämiseen ulkoilmasta. Perinteisesti sisäilmaa lämmittämällä lämpöenergia virtaa ilmassa rakennuksen vaipan läpi ulkoilmaan. Lämmönlähteen ollessa seinän sisällä johtuu lämpövirta seinästä sekä suoraan ulos että sisälle, jolloin huoneilman ja ulkoilman välinen lämpövirta häviää. Tämä pätee kuitenkin vain niissä seinän osissa, joissa lämmitysputkien lämpöenergia riittää pitämään seinän lämpötilan huoneilman lämpötilaa suurempana. Kuvassa 14 on esitetty seinän sisäisen lämmönlähteen luoman lämpötila- ja kosteusjakauman ero tavanomaiseen lämmittämättömään rakenteeseen verrattuna.

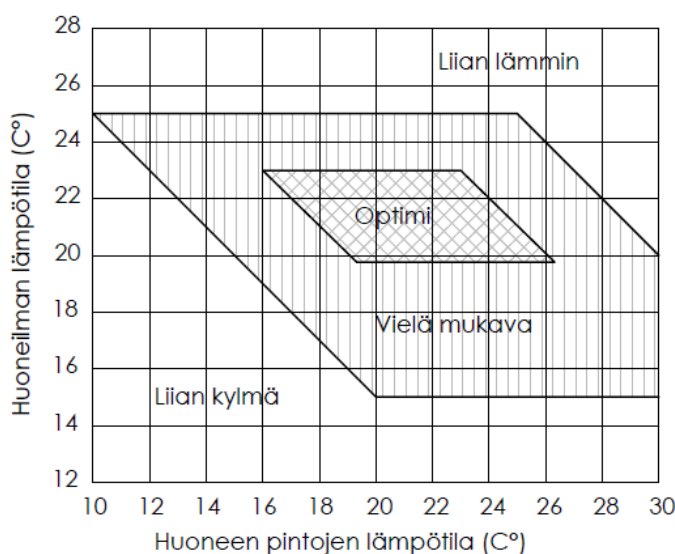


Kuva 14. Eristämättömän kahden kiven maanvastaisen tiiliseinän lämpö- ja kosteusjakaumat. Vasemmalla ilman seinän sisäistä lämmitystä ja oikealla temperierung-lämmitysputki 15 mm:n syvyydessä seinän sisäpinnasta. Ulkopuolella $T = 5^{\circ}\text{C}$ ja $\text{RH} = 95\%$. Sisäpuolella $T = 21^{\circ}\text{C}$ ja $\text{RH} = 50\%$. Kyseessä on yksidimensioinen tarkastelu suoraan seinärakenteen läpi, joten huomioitavaa on, että lämmityksen aiheuttamat jakaumat muuttuvat siirryttäessä kauemmaksi lämmönlähteestä.

Kuvan 14 lämmittämättömässä tapauksessa lämpövirta seinän läpi ulospäin oli $15,6 \text{ W/m}^2$. Oikeanpuoleisessa jakaumassa, jossa seinän sisäisen lämmönlähteen teho oli 100 W/m^2 , lämpövirrat olivat ulkopinnalla noin 30 W/m^2 ulospäin ja sisäpinnalla 70 W/m^2 sisäänpäin. Seinästä sisään ja ulos johtuneet lämpövirrat vastaavat yhdessä siis lämmönlähteen tehoa, mikä vahvistaa sen, että sisä- ja ulkopintojen välistä lämpövirtaa ei ole. Kuvan kosteusjakaumasta näkee myös temperierung-menetelmän kuivattavan vaikutuksen, mikä osaltaan parantaa rakenteen lämmöneristyskykyä. Materiaalin kuivumisen vaikutus lämmöneristävyyteen riippuu kuitenkin huomattavasti materiaalin ominaisuuksista sekä veden määrästä rakenteessa ennen lämmitystä.

Teoreettisessa tilanteessa, jossa tilan kakkien pintojen lämpötila olisi saman suuruinen sisäilman lämpötilan kanssa, ei huoneilman ja pintojen välistä lämpövirtaa olisi ollenkaan. Tästä johtuen, mitä isompi osa rakennuksen vaipan sisäpinnasta lämmitetään, sitä tasaisempi on huoneistojen lämpötila. Koska lämpöä kuitenkin johtuu ulos muista ra-

kennuksen osista, kuten ikkunoista, ala- ja yläpohjista sekä ilmanvaihdon mukana, suuntautuu lämpövirta lämmitysputkien luomista lämpimistä kaistaleista viileämpään sisäilmaan. Muodostunut sisäilmaa lämpimämpi seinän sisäpinta myös säteilee lämpöä huoneeseen, jolloin ihmisen kokema operatiivinen lämpötila nousee (Kuva 15). Perinteisissä ilman lämmitykseen perustuvissa lämmitysjärjestelmissä operatiivinen lämpötila koostuu korkeammasta ilman lämpötilasta ja pienemmästä seinäpintojen säteilylämpötilasta. Temperierung-lämmitysjärjestelmässä se koostuu päinvastoin pienemmästä sisäilman lämpötilasta ja suuremmasta pintojen lämpötilasta. Tästä johtuen esimerkiksi korkeissa huonetiloissa seinäpinnat voidaan lämmittää vain keskivertoihmisen korkeudelta seinän alareunasta, jolloin seinästä säteilevä lämpö ohjataan ihmisten oleskelualueelle. Tällä tavoin voidaan ehkäistä korkean huoneen katonrajaan karkaavan lämpimän ilman energiahäviöitä.

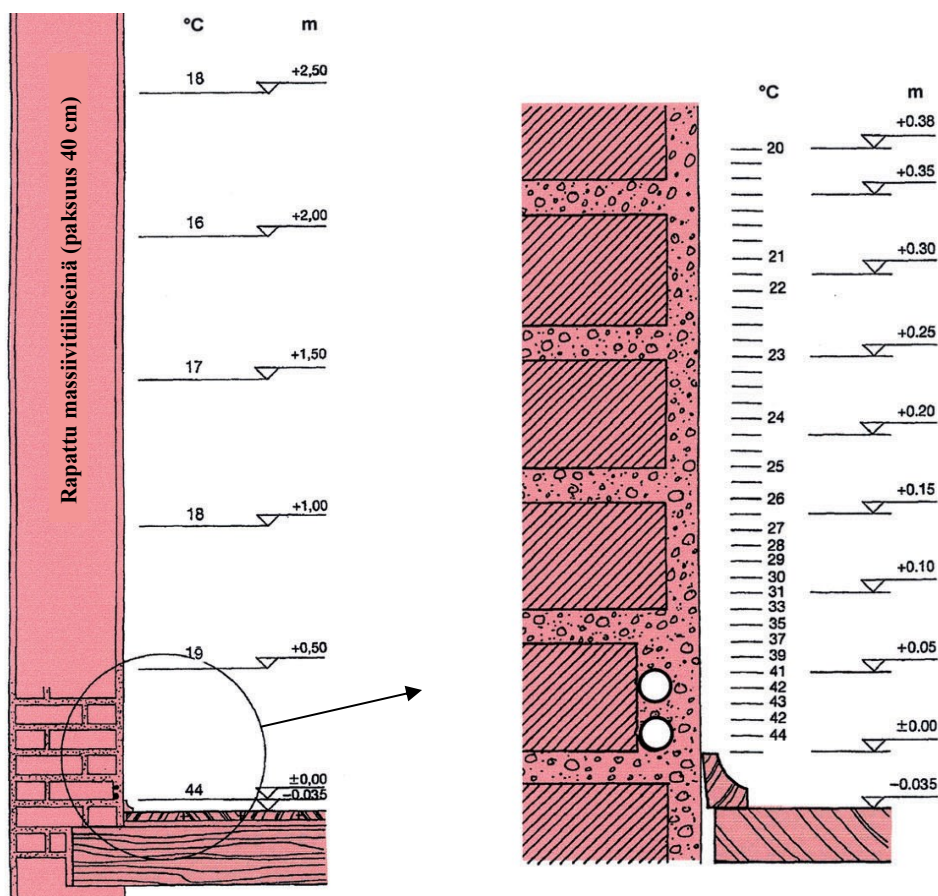


Kuva 15. Pintojen lämpötilan vaikutus koettuun mukavuuslämpötilaan. (22)

Temperierung-lämmitysjärjestelmän ideana on siis lisätä huonetilassa olevaa lämpösäteilyä ja laskea sisäilman lämpötilaa ilman että koettu lämpötila muuttuu. Sisäilman lämpötilan laskeminen kompensoi ainakin osittain suoraan seinän läpi johtuvaa lämpöenergiaa, ja joissakin tapauksissa yhdessä kuivemman seinärakenteen kanssa mahdollisesti jopa säästää lämmityskustannuksissa. Tutkimusten mukaan jo yhden celsiusasteen huonelämpötilan nousu johtaa noin 6-10 % suurempaan energiankulutukseen (34). Kytettäessä lämmitysjärjestelmä päälle, kuluttaa se kuitenkin aluksi enemmän energiaa, kun rakenteet sekä lämpenevät että kuivuvat. Ajan myötä saavutetaan stabiilimpi lämpötila, jolloin myös lämmitykseen tarvittu energia pienenee. Menetelmän energiankulutusta käsitellään lisää kappaleessa 4.6.

Lämmitysjärjestelmänä käytettäessä temperierungin suurimmat hyödyt tavanomaiseen patterilämmitysjärjestelmään verrattuna ovat tasaisempi huonelämpötila, konvektiovirtausten eliminointi sekä lämpimät seinäpinnat myös talvella. Temperierungin luomalla tasaisella lämmityksellä eliminoidaan myös muun muassa kuumien pattereiden ja viileiden nurkkien väliset lämpötilaerot. Tästä johtuen temperierung-menetelmää on mahdollista käyttää myös lattialämmitysjärjestelmän kaltaisena mukavuuslämmityksenä halutuissa rakennuksen osissa. Lattialämmitykseen olennaisempuna erona on vaakatasossa kulkeva lämpösäteilyn suunta seinistä huonetilaan, jolloin lämpösäteily jakautuu tasaisemmin ihmisten oleskelualueelle.

Kuvassa 16 on esitetty tavanomaisimman, rakenteiden sisään asennetun vesikiertoisen temperierung-järjestelmän luoma lämpötilajakauma tiilirakenteisessa ulkoseinässä. Kyseisessä tilanteessa mitattu sisäilman lämpötila oli 20,5 °C ja ulkoilman -10 °C. Seinä on 1,5-kiven tiiliseinä, jolla on paksuutta noin 40 cm. Seinän molemmilla puolilla on noin 10-20 mm:n paksuinen laastikerros. Putkessa kiertävä vesi oli mittaushetkellä noin 60 °C, jolloin lämpökameralla mitattiin seinän pinnasta noin 40 °C:n lämpötila putken kohdalta. Kuvassa on nähtävissä selvästi muuta rakennetta lämpimämpi kaistale lämmitysputkien ympärillä. Pääosa temperierung-menetelmän lämmönjakelusta tapahtuu tämän lämpimän kaistaleen säteilemän energian välityksellä. Tämän lisäksi myös lämmitysputkien kohdalla oleva ilmamassa lämpenee ja levittää lämpöenergiaa ylöspäin noustessaan seinän pintaa pitkin. Kuvan tapauksessa on arvioitu lämmitysputkista sisäilmaan johtuvan lämmitystehon olevan noin 40 W/m. (21)



Kuva 16. Erään saksalaisen temperierung-kohteen lämpökameralla mitattu tiiliseinän sisäpuolinen lämpötilajakauma. Kyseessä on 40 cm paksu tiiliseinä jonka alareunassa kulkee kaksi noin 60 °C:n lämpötilassa olevaa vesikiertoista lämmitysputkea. Rappauskerroksen paksuus lämmitysputkien päällä on noin 15 mm. Ulkolämpötila mittaushetkellä oli -10 °C ja sisälämpötila 20,5 °C. (21)

Lämmitysjärjestelmänä käytettäessä temperierung-menetelmän suurimpiin etuihin luokituu siis tasaisesti jakautuva lämpöenergia lämpimien seinien johdosta. Menetelmän soveltuvuus lämmitysjärjestelmäksi vaatii kuitenkin vielä lukuisia lisätutkimuksia erityisesti erilaisten seinärakenteiden ja energiankulutuksen kannalta. Esimerkiksi nykyaikaisten asuinrakennusten lämmitysjärjestelmänä on kyseistä menetelmää tutkittu vasta vähän. Tähän mennessä suurin osa sekä käyttökohteista että tutkimuksista koskee muuseoita, linnoja sekä muita historiallisia ja yleensä massiivirakenteisia rakennuksia.

Myöskään lämmitysputkien mitoituksen ja sijoittelun merkitys menetelmän energiankulutukseen ei ole vielä täysin selvillä. Kilian, Bichlmair ja Krus esimerkiksi päätyivät uusimmassa julkaisussaan lopputulokseen, jossa koko seinän kattava lämmitys todettiin energiatehokkaammaksi, kuin Großeschmidtin ohjeiden mukainen seinän alareunaan asennettu temperierung-lämmitysjärjestelmä (35). Kyseisestä tutkimuksesta lisää myöhemmin kappaleessa 4.7.3.

4.4.3.1 Temperierung ja patterilämmitys

Stefan Bichlmairin mukaan (29) temperierung-järjestelmän käytön ja mitoituksen lähtökohtana on käyttötarkoituksen mukaan määriteltävä rakenteiden ja huonetilan lämpötila. Karkeasti jaettuna vaihtoehdot halutuille lämpöolosuhteille ovat pysyvä lämpötila, liukuva lämpötila tai ylläpitolämmitys. Liukuvan ja ylläpitolämmityksen tarkoituksena on yleensä suhteellisen kosteuden stabilointi ja rakennukseen kertyvän kosteuden aiheuttamien ongelmien ehkäisy. Tällaisissa tilanteissa voidaan temperierung-menetelmän rinnalla käyttää myös perinteisempiä lämmitysjärjestelmiä, jos halutulle huonetilan lämpötilalle on asetettu korkeammat vaatimukset.

Temperierung-lämmitysjärjestelmän kanssa samaan vesikiertoon voidaan liittää esimerkiksi vesikiertoisia patterilämmittimiä. Samassa vesikierrossa toimiessaan veden lämpötila on kuitenkin Großeschmidtin (21) mukaan säädettävä temperierung-menetelmän vaatimusten perusteella. Patterit voidaan asentaa esimerkiksi ikkunoiden alle ja ne voidaan varustaa erillisillä päälle/pois -kytkimillä, joilla voidaan tarvittaessa nopeasti muuttaa huoneen lämpötilaa muuttamatta lämmitysputkiin syötettävän veden lämpötilaa. Temperierung-järjestelmän kanssa sarjaan kytketty patterilämmitys suositellaan laittamaan päälle asennuksen jälkeen vasta sitten, kun seinien sisäiset lämmitysputket ovat lämmittäneet rakenteet ja tasanneet oman energiankulutuksensa. Tämän jälkeen lämmityskapasiteettia riittää paremmin myös pattereihin. Tarvittavan lisälämmitystehon mitoittaminen on myös helpompaa, kun rakenteet ovat valmiiksi lämmentyneet ja näin ollen olosuhteet tasoittuneet.

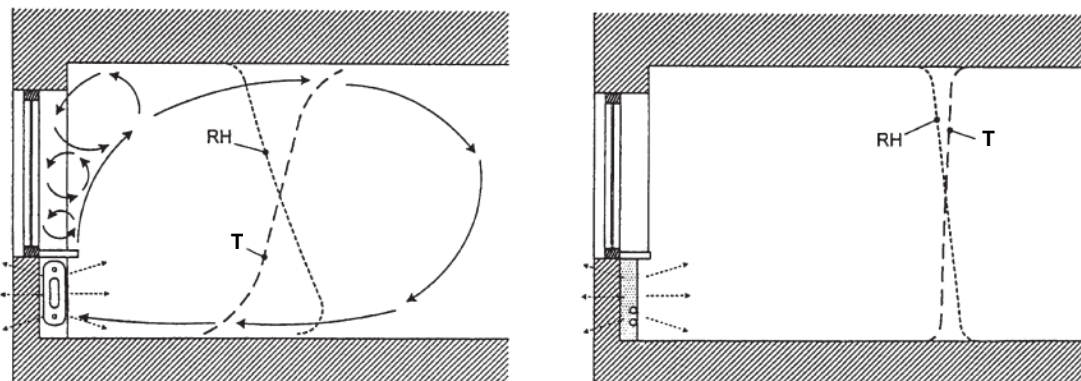
Patterilämmityksen tuoma säädettävä lisälämpö on otollista erityisesti kovimmilla pakaskasteleilla tuomaan lisätehoa ja mahdollistamaan rakennuksen nopean lämmittämisen. Temperierung-lämmitysjärjestelmällä lämpötilojen muutokset tapahtuvat yleensä rakenteiden varaavuuden johdosta hitaasti. Tästä johtuen esimerkiksi tilanteissa, joissa lämpötila on ehtinyt huomaamatta laskea, voi sen nostaminen halutulle tasolle olla hyvinkin hidasta ilman ylimääräisiä pattereita. Thomas Lötherin (22) tekemien menetelmän parissa työskennelleiden ihmisten haastattelujen perusteella temperierung-lämmitysjärjestelmä sellaisenaan on sopiva linnojen tyypisiin rakennuksiin, joissa sisäilman lämpötila voi vaihdella vuodenaikojen mukaan. Julkaisun mukaan lisälämmitystä esimerkiksi tavallisilla lämpöpattereilla tarvitaan muun muassa nykyaikaisiin toimisto- ja asuinrakennuksiin. Lämmityksen tarve on kuitenkin kaikilla lämmitysjärjestelmillä riippuvainen lämmitettävän rakennuksen vaipan lämmöneristävyydestä, joten suoria johtopäätöksiä on vaikea tehdä.

4.4.4 Sisäilmasto

Kun lämmitysjärjestelmä asennetaan ulkoseiniin, eli tavallisesti rakennuksen kylmimpiin osiin, tasoittuvat lämpötilaerot rakennuksen vaipan ja sisäilman välillä. Tämän lisäksi seinän alareunaan asennetut lämmitysputket vaikuttavat kuvan 17 mukaisesti myös huoneen pystysuuntaiseen lämpötila- ja kosteusjakaumaan. Perinteiseen patteri-

lämmitykseen verrattuna hyödyiksi muodostuvat muun muassa konvektiovirtausten väheneminen sekä lämpö- ja kosteusolosuhteiden tasaantuminen. Näiden lisäksi sisäilma paranee myös kosteusongelmien aiheuttamien ilmaa pilaavien päästöjen ehkäisyn kautta.

Erityisesti korkeissa tiloissa säteilyyn perustuvan lämmityksen lämpötilajakauma voi olla hyödyksi, jos lämpöenergia halutaan ohjata vain ihmisten oleskelualueelle. Tavanomaisien ilman lämmitykseen perustuvien järjestelmien lämmittämä ilmamassa nousee ylöspäin. Säteilylämmitys puolestaan voidaan ohjata paikallisesti ihmisten oleskelutiloihin ja kääntää operatiivinen lämpötilajakauma päinvastaiseksi.



Kuva 17. Periaatepiirros perinteisen patterilämmityksen (vasemmalla) ja temperaturierung-menettelmän (oikealla) vaikutuksista huoneilmastoon (24)

Seinälämmityksen aiheuttama stabiloitu sisäilmasto voidaan Jochen Käferhausin mukaan (36) saada aikaiseksi jo kohtuullisen alhaisilla lämmitysputkien käyttölämpötiloilla. Tämä tarkoittaa sitä, että sisäilman kosteus- ja lämpöolosuhteita tasoittava vaikutus tulee mahdollisesti esille, vaikka temperaturierung-menettelmän ensisijainen tarkoitus olisi ehkäistä ulkovaipan kosteusongelmia tavanomaisen lämmitysjärjestelmän rinnalla. Tähän viittaavat myös Suomenlinnan temperaturierung-kokeiluista saadut käyttäjäkokemukset, joiden mukaan huoneistojen sisäilman laatu on parantunut huomattavasti menetelmän käyttöönoton myötä (37). Suomenlinnan kohteet esitellään tarkemmin kappaleessa 4.7.1.

Useissa lähteissä mainitaan seinälämmityksen eduiksi hitaasti muuttuvat sisäilmaston olosuhteet. Tämä johtuu erityisesti massiivisiin rakenteisiin johdetun lämpöenergian puskuroivasta vaikutuksesta, jonka johdosta lämpötilan ja sitä kautta myös suhteellisen kosteuden häiriöiden vaikutukset tasaantuvat. Esimerkiksi pidettäessä ovea tai ikkunaa auki, pysyvät lämpö- ja kosteusolosuhteet pidempään vakioina rakenteissa kuin sisäilmassa.

4.4.4.1 Temperaturierung ja ilmankosteus

Huoneilman suhteellinen kosteus riippuu olennaisesti sen lämpötilasta, huonetilan kosteuslähteistä ja ulkoilman olosuhteista. Erityisesti talvikuukausina Suomessa lämpimän sisäilman suhteellinen kosteuspitoisuus saattaa laskea hyvinkin alhaiseksi.

Säteilyyn perustuvan lämmityksen mahdollistama matalampi huoneilman lämpötila muodostaa talviaikaan miellyttävämmät kosteusolosuhteet ilman erillistä ilmankostutusta. 1 °C:n verran korkeampi ilman lämpötila johtaa noin 3 % alhaisempaan suhteelliseen kosteuteen samalla absoluuttisella kosteuspitoisuudella (34). Tästä johtuen kovien pak-

kasjaksojen aiheuttamaa sisäilman kuivumista voidaan ehkäistä johtamalla lämpö huoneeseen säteilynä huoneilman lämmittämisen sijaan. Tämä siis vähentää tarvetta ylimääräiselle ilmankostutukselle, joka saattaisi olla haitaksi erityisesti kylminä pysyville rakenteille. Jos temperierung-menetelmän yhteydessä kuitenkin päädytään käyttämään erillistä ilmankostutusta, voidaan se edellä mainituista syistä alimitoittaa tavanomaisiin tapauksiin nähden (21).

Jochen Käferhaus (36) tuo myös esille viileämmän ja näin ollen kosteamman hengitysilman aiheuttamat terveyshyödyt ihmisille. Liian kuiva ilma saattaa aiheuttaa asukkaille muun muassa hengitysteiden, limakalvojen ja ihon ärsytystä. Tästä syystä hän toteaa ihmiskehölle soveltuvimman lämmityksen olevan säteilyyn perustuvaa. Großeschmidt (21) puolestaan painottaa temperierung-järjestelmän etuna kosteuspitoisuuksien vaihteluiden tasaamista ilman kalliita ilmastointijärjestelmiä. Tähän päästään, kun sisäilman muutokset tapahtuvat hitaasti seuraten ulkoilman keskimääräisiä olosuhteita, jolloin sisäilman ja rakenteiden väliset kosteuserot ehtivät tasaantua.

Temperierung-menetelmää on joissakin tapauksissa mahdollista käyttää myös huoneilman liiallisen kosteuden laskemiseen, jos ilman kosteus on peräisin ympäröivistä rakenteista. Tällaisessa tapauksessa on kuitenkin huomioitava, että huoneilman kosteusrasitus tulee rakenteiden lämmityksen alkuvaiheessa nousemaan huomattavasti ennen kuivattavaa vaikutusta. (34) Kesäaikana lämmitysjärjestelmää ei yleensä pidetä päällä kuin korkeintaan kosteusongelmista kärsivissä kellaritiloissa. Pois päältä ollessaan menetelmä ei luonnollisesti vaikuta huoneen kosteuskajaumaan, minkä johdosta kesäaikaiset sisäilman kosteusolosuhteet ovat tyypillisesti vastaavat kuin muillakin lämmitysjärjestelmillä. Ongelmatapauksissa, kuten kosteissa kellaritiloissa kondensaation ja muiden kosteusvaurioiden riskiä voidaan kuitenkin vähentää kesäaikaanakin pitämällä rakenteiden lämpötilaa hieman sisäilmaa korkeampana.

Temperierung-menetelmällä seinien ja huoneilman välinen kosteuskajauma muuttuu päinvastaiseksi perinteisiin lämmitysjärjestelmiin verrattuna. Tyypillinen tilanne eli lämmin ilma ja viileämmät seinät aiheuttavat suhteellisen kosteuden kohoamisen pintojen lähellä. Lämpimät seinät yhdessä viileän ilman kanssa puolestaan nostaa huoneen keskellä olevan ilman suhteellista kosteutta ja laskee sitä pintojen lähellä. Ilman absoluuttisen kosteuden määrää ei siis välttämättä tarvitse nostaa suhteellisesti kosteamman ilman aikaansaamiseksi.

4.4.4.2 Museoiden sisäilmasto

Kosteusolosuhteet ovat usein avainasemassa myös silloin, kun suunnitellaan erityisen herkille esineille soveltuvia näyttelytiloja. Temperierung-menetelmää koskevissa tutkimuksissa ja julkaisuissa (21, 34) tuodaankin vahvasti esille sen soveltuvuus museoiden sisäilmaston hallintaan. Menetelmää hyväksi käyttäen on pyritty luomaan homogeeninen ja hitaasti muuttuva niin kutsuttu dynaaminen sisäilmasto, jolla otetaan huomioon rakenteiden ja ihmisten hyvinvoinnin lisäksi myös näyttelyesineiden säilyvyys (29). Varsinkin seinille ripustettavat taulut, seinämaalaukset ja kirjahyllyissä seinää vasten olevat kirjat saattavat kärsiä kylmän seinäpinnan aiheuttamista kosteushaitoista. Temperierung-menetelmällä voidaan tällaisissa tilanteissa luoda kosteusongelmia ehkäisevä niin kutsuttu konservointilämmitys, joka tasoittaa näyttelytilan olosuhteita. Koska esineet ovat usein herkempiä kosteudelle kuin lämpötilalle, voidaan joissakin tapauksissa näyttelytilojen lämmitys toteuttaa myös ulkoilman mukaan liukuvana ilman suurempia

vaihteluja suhteellisen kosteuden arvoissa. Näin toteutettuna tilan lämpötila vaihtelee hitaasti kosteuden pysyessä suhteellisen vakiona.

Seinärakenteiden lämmittäminen pienentää siis rakenteiden, sisäilman ja näyttelyesineiden välisiä lämpö- ja kosteusvaihteluja, mikä ehkäisee kylmien pintojen aiheuttamia paikallisesti kohonneita kosteuspitoisuuksia sekä liian nopeita kosteuspitoisuuksien vaihteluja. Tästä johtuen lämpimät rakenteet suojelevat itsensä lisäksi myös seinille ripustettuja esineitä kosteusvaurioilta. Tällaisista kylmän seinän aiheuttamista näyttelyesineiden vaurioista voidaan mainita käytännön esimerkkinä muun muassa Wienin kuvataideakatemia taidegalleria, jossa taulujen taustat olivat homehtuneet sinne kondensoituneen veden takia. Kyseisessä kohteessa ongelmista oli päästy eroon asentamalla seinän alareunaan kaksi vesikiertoista lämmityspotkea lämmittämään rakenteita ja asettamalla sisäilman lämpötila ulkoilman mukaan liukuvaksi enintään 18-26 °C:n rajoissa. Tarkoituksena oli siis kosteusolosuhteiden tasaaminen pienentämällä rakenteiden ja ilman lämpötilaeroja sekä sallimalla kausittainen hitaasti tapahtuva olosuhteiden vaihtelu. (34)

Myös muissa näyttelytiloissa suoritettujen mittauksien perusteella temperierung-menetelmällä on onnistuttu luomaan tasaiset lämpö- ja kosteusolosuhteet huonetilan ja rakenteiden välille. Itä-Saksassa sijaitsevassa taidegalleriassa oli seinäpinnoille ja erityisesti taulujen taakse kerääntyneen kosteuden johdosta päädytty myöskin kokeilemaan temperierung-menetelmää. Asennuksen jälkeen tehdyissä mittauksissa huoneilman ja taulujen takana piilossa olevien seinäpintojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden erot olivat maksimissaan 5 %. Kyseisessä kohteessa onnistuttiin siis temperierung-menetelmällä ehkäisemään kylmän seinän aiheuttamat kosteusongelmat rakenteissa ja näyttelyesineissä. Haittapuoleksi rakenteiden lämmittämisestä muodostui kesäaikana liian korkeiksi kohonneet sisäilman lämpötilat. Tämä kuitenkin ehkäistiin jälkikäteen asennettujen aurinkovarjostimien avulla. (38)

Edellä mainittu Wienin kuvataideakatemia taidegalleriassa toteutettu dynaaminen sisäilmasto on kuitenkin ristiriidassa Kansainvälisen museoneuvoston ohjeiden kanssa, joiden mukaan ilmastoinnilla tulisi luoda stabiili ympärivuotinen lämpötila ja kosteus. Joidenkin lähteiden mukaan juuri näiden ohjeiden mukaisesti ilmastoidut vanhat museorakennukset ja niiden näyttelyesineet ovat kärsineet kosteusongelmista. (21) Temperierung-menetelmää on pidetty potentiaalisena vaihtoehtona erityisesti huonosti eristettyihin historiallisiin rakennuksiin, jotka eivät ole luonnostaan kovin energiatehokkaita ja joihin haetaan mahdollisimman vähän rakenteita muokkaavia ratkaisuja. Menetelmä on kuitenkin suhteellisen vähän rakenteita rikkova ja helposti muokattavissa tai poistettavissa tarpeen vaatiessa.

4.4.4.3 Ilmanvaihto

Temperierung-menetelmä ei aseta rajoituksia rakennuksen ilmanvaihdon toteuttamiselle. Useissa lähteissä sitä pidetään yksinkertaisen ilmanvaihtojärjestelmän kanssa toteutettuna vaihtoehtona nykyaikaiselle koneelliselle ilmastointisysteemille. Yksinkertaisimmillaan toteutus voidaan tehdä painovoimaisella ilmanvaihdolla. (21) Edellisessä kappaleessa mainitussa Wienin kuvataideakatemia taidegalleriassa temperierung-järjestelmän rinnalle ilmanvaihdon yhteyteen asennettiin myös lämmöntalteenottolaitteet, jotta rakennuksen energiatehokkuus saatiin maksimoitua (34).

Kesäaikainen ilmastointi ja viilennys voidaan toteuttaa samoin kuin minkä tahansa muunkin lämmitysjärjestelmän kanssa. Kesäaikana temperierung-menetelmää ei yleensä pidetä päällä kuin korkeintaan kellaritiloissa. Esimerkiksi Wienin kuvataideakatemiassa viilennys ohjelmoitiin siten, että se kytkeytyy päälle huonelämpötilan ylittäessä 26 °C.

Sekä kokemuseräisen tiedon (31) että WUFI® 2D -ohjelmalla suoritettujen mallinnusten (ks. kappale 5) perusteella temperierung-menetelmä kohottaa väliaikaisesti rakenteista huoneilmaan suuntautuvan kosteusvirran voimakkuutta, mikä nostaa huoneilman absoluuttista kosteutta. Lämmityksen alkuvaiheessa voidaan huoneilman kosteuspitoisuuden liiallista kohoamista ehkäistä tehostamalla ilmanvaihtoa.

4.5 Käyttöohjeistus

4.5.1 Yleistä

Kuten yleensä kaikissa rakennus- ja korjauskohteissa, ovat lähtötiedot suuressa roolissa jo ennen kuin päädytään valitsemaan käytettävää menetelmää. Ennen temperierung-järjestelmän käyttöönottoa on siis hyvä vertailla sitä muihin lämmitys- tai kosteudenhallintamenetelmiin. Kosteusongelman ehkäisynä käytettäessä on ennen edellä mainittua vertailua myös selvitettävä kosteudenlähde, jotta menetelmää voidaan perustellusti käyttää ja jotta sitä käytetään oikein. Koska menetelmän kehitys on tapahtunut pääosin Saksassa, pohjautuvat myös tässä kappaleessa esitetyt ohjeistukset pääasiassa saksalaiseen kirjallisuuteen. Suunnittelussa ja mitoituksessa on kuitenkin otettava huomioon Suomessa vallitsevat ilmasto-olosuhteet. Käytännössä erojen tulisi näkyä erityisesti käytettävissä suunnittelun lähtöarvoissa muun muassa kylmempinä ulkoilman lämpötiloina ja yleensä suurempina seinänpaksuuksina.

Temperierung-järjestelmän käyttäminen on siis aina kohdekohtainen valinta, jossa on otettava huomioon muun muassa olemassa olevat rakenteet, ongelmat, käyttäjän tarpeet, rakennusfysikaaliset näkökulmat sekä taloudellisuus. Joissakin tapauksissa halutut tavoitteet voivat myös olla ristiriidassa keskenään. Esimerkiksi museoissa näyttelyesineiden vaatimukset ilmasto-olosuhteista saattavat poiketa näyttelyvieraiden vaatimuksista. Ihmisille tärkeimmässä roolissa on lämpötila ja esineille kosteus (29). Myös lämmitysputkien asentaminen joko seinän sisälle tai pinnalle vaikuttaa sekä asennuksen ulkonäköön että rakennusfysikaaliseen toimintaan. Kuten muutenkin rakentamisessa, on myös temperierung menetelmän käyttäminen monissa tilanteissa kompromissi haluttujen vaikutusten välillä.

4.5.2 Vaatimukset

Tämän hetkisen tiedon perusteella olennaisin vaatimus temperierung-järjestelmän käytön kannalta on rakenteiden massiivisuus. Koska lämmitysputkien lämpöenergia johdetaan ensisijaisesti seinärakenteiden kautta huoneistoon, on erityisesti sisäpuolisten materiaalien hyvä olla sekä lämpöä varaavia että lämpöä johtavia. Vaikka käytön kohteena ovat Saksassa olleet erityisesti massiivirakenteiset kivitalot, on kuitenkin Großesmidtin (21) mukaan myös kevyemmissä rakenteissa potentiaalia. Hän pitää kivirakenteiden ohella mahdollisina kohteina myös muun muassa perinteisiä hirsitaloja sekä Keski-Euroopassa tyypillisiä ristikkotaloja. Ohuemmilla rakenteilla Großesmidt pitää vaatimuksena kuitenkin paksuja eristeitä.

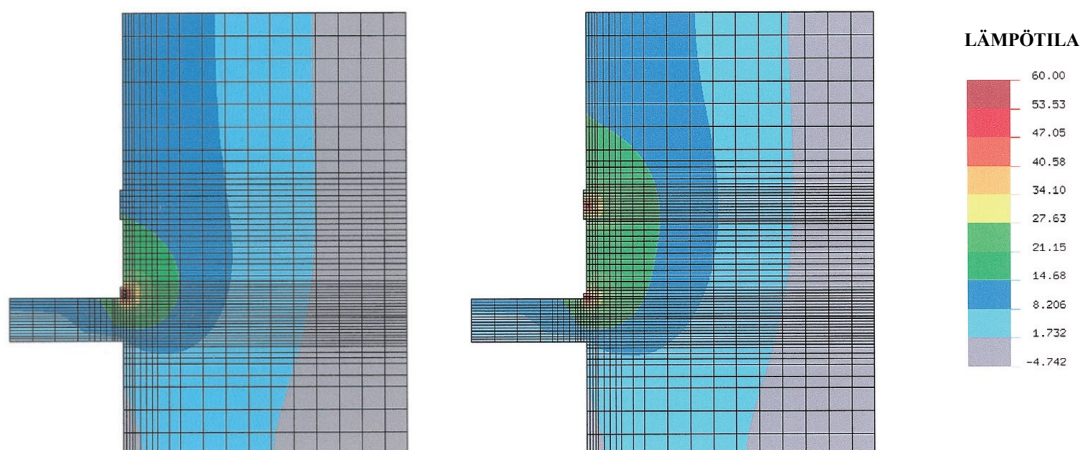
Kevytrakenteisilla rakennuksilla temperierung-menetelmällä ei saada samoja vaikutuksia kuin massiivirakenteisilla (21). Ohuemmat rakenteet ovat esimerkiksi herkempiä nopeille lämpötilan vaihteluille ja auringon säteilylle. Myös rakenteiden kuivumisesta johtuva lämmöneristävyyden paraneminen jää pienemmäksi ohuemmilla seinärakenteilla, kun kuivatettavaa materiaalia on vähemmän. Jochen Käferhaus kuitenkin toteaa julkaisussaan (36) oman 25-vuotisen kokemuksensa perusteella koko rakennuksen lämmittävän temperierung-järjestelmän soveltuvan oikeanlaisella suunnittelulla massiivisten rakenteiden lisäksi myös kevyisiin rakenteisiin.

Temperierung-menetelmän käyttämisessä restaurointikohteissa on huomioitava myös kohteena olevan rakennuksen historialliset näkökulmat. Kulttuurihistoriallisesti tärkeissä rakennuksissa on yleensä suotavaa tehdä korjaukset alkuperäisiä rakenteita ja arkkitehtuuria kunnioittaen. Tästä syystä myös seinään asennettavien lämmitysputkien ulkonäköä ja sopivuutta on arvioitava. Ulkonäköön voidaan vaikuttaa muun muassa päätöksellä, käytetäänkö upotettua vai seinän pinnalle asennettua putkea.

4.5.3 Mitoitus ja suunnittelu

Kuten muissakin lämmitysjärjestelmissä, on myös temperierung-menetelmässä sen mitoitus tärkeässä roolissa. Bichlmairin (29) mukaan vääränlainen mitoitus voi johtaa muun muassa huonoihin sisäilma-olosuhteisiin tai suhteettoman korkeaan energiankulutukseen. Pahimmassa tapauksessa väärällä mitoituksella päädytään vain lämmittämään kostea seinä sitä kuitenkaan kuivattamatta. Tällainen tilanne voi johtaa jopa haitallisten homekasvustojen olosuhteiden parantamiseen. Suunnitteluvaiheessa on hyvä myös vertailla temperierung-menetelmää muihin ratkaisuihin ja löytää optimaalisin korjaus- tai lämmitysmenetelmä. Kapillaarinen nousu voidaan estää myös perinteisillä fyysisillä katkoilla ja joissakin tapauksissa riittävän suuri rakenteita kuivattava vaikutus voidaan saada aikaan myös huoneilmaa lämmittämällä (31). Suoraan rakennetta lämmittämällä kuivuminen tapahtuu yleensä kuitenkin tehokkaammin.

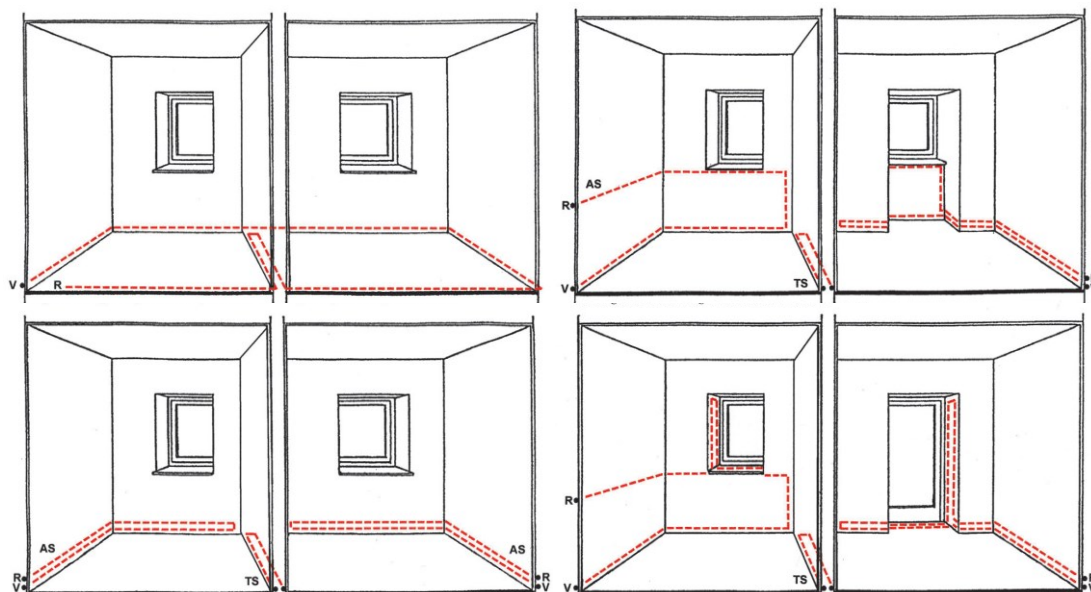
Mitoituksen ja suunnittelun lähtökohtana tulee olla järjestelmän käyttötarkoitus. Esimerkiksi rakenteiden kuivattamiseen tai kapillaarisen veden nousun ehkäisyyn ei välttämättä vaadita yhtä suuria lämmitysputkien lämpötiloja, kuin rakennuksen lämmittämiseen. Erityisesti kosteusongelmien korjaamisessa on lämmön- ja kosteudenmallinnusohjelmien käyttäminen suotavaa. Kun kosteuden lähde on tiedossa, voi mallinnuksella saada hyvän arvion asennettavan lämmitysputken vaadittavasta tehosta. Rakenteiden kuivatuksen optimaalinen tehontarve on hyvä arvioida kylmimpien kuukausien lisäksi myös kesäajalle, jotta voidaan ehkäistä liian suuret lämpökuormat lämpimimpinä kuukausina. Mallintaminen auttaa myös löytämään optimaaliset korkeudet ja keskinäiset etäisyydet lämmitysputkille.



Kuva 18. Lämmön jakautuminen celsiusasteina ilmoitettuna kahden metrin paksuisessa tiiliseinässä. Vasemmalla kaksi vierekkäistä 60°C:n lämmitysputkea. Oikealla kaksi 60°C:n lämmitysputkea 80 cm etäisyydellä toisistaan. (39)

Kuten kuvasta 18 voi nähdä, voidaan lämmitysputkien sijoittelulla vaikuttaa lämmön jakautumiseen seinärakenteessa ja siten myös lämmönjakeluun huoneistossa. Kapillaarikatkona käytettäessä riittää useimmissa tapauksissa yhden vesikiertoisen putken meno- ja paluulinjojen asentaminen samalle tasolle seinän alareunaan. Kapillaarikatkon toimintaan ja tehontarpeeseen vaikuttaa kuitenkin olennaisesti seinän materiaali ja paksuus, joiden merkitys voidaan arvioida mallinnusohjelmien avulla. Seinän paksuuden merkityksestä lisää mallinnusten yhteydessä kappaleessa 5.2.

Lämmitysjärjestelmänä käytettäessä on tavoitteena mahdollisimman suuren lämpöä säteilevän seinäpinnan muodostaminen ihmisten oleskelualueelle. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi kahdella lämmitysputkella toteutetussa järjestelmässä nostamalla paluuputki korkeammalle, jolloin seinään muodostuu yksi leveä tai kaksi erillistä lämmintä kaistaletta. Lämmitystehon nostamiseksi voidaan ylempi kaistale tehdä myös erillisellä edestakaisella lämmitysputkilinjalla, jolloin seinässä kulkee kaksi menolinjaa ja kaksi tulo- linjaa. Kuvassa 19 on esitetty erilaisia yhdellä luopilla toteutettuja asennustapoja. Vastaavat lämmityslinjat voidaan toteuttaa myös sähköllä toimivilla lattialämmityskaapeleilla.

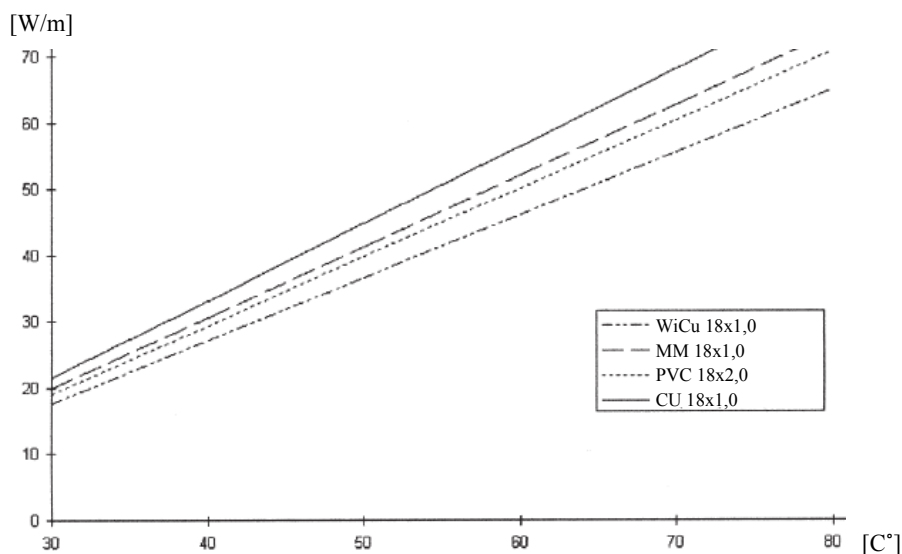


Kuva 19. Erilaisia temperierung-järjestelmän asennustapoja käyttötarkoituksen mukaan (21)

Lämmitysjärjestelmänä käytettäessä vaikuttaa mitoittamiseen koko rakennuksen pinta-alan lisäksi myös lämmitettävän huoneen pinta-ala. Tämä pätee erityisesti silloin, kun oleskelualueen lämpötila mitoittetaan operatiivisen lämpötilan perusteella ja etäisyydet lämmönlähteeseen kasvavat. Säteilylämmityksen intensiteetti pienenee neljäsosaan, kun välimatka lämmönlähteeseen kaksinkertaistuu. Tällöin kaukana seinistä oleva viileä huoneilma saattaa tuntua kylmältä, jos seinistä säteilevä lämpö ei enää riitä nostamaan koettua operatiivista lämpötilaa riittävästi. Tästä syystä suurissa rakennuksissa ja huone-tiloissa voidaan harkita joissakin tapauksissa myös väliseiniin asennettavia lämmitysputkia. (40)

Lämmitysjärjestelmän mitoituksen lähtökohtana on rakennuksen huonekohtainen lämmityksentarve ja sen jälkeen valinta liukuvan tai pysyvän lämpötilan välillä (29). Mallinnuksilla tai laskelmilla arvioidaan lämmitysputkilla lämmitetyn seinän lämpösäteilyä ja tätä kautta huonetilassa oleskelevan ihmisen kokema operatiivinen lämpötila. Laskettu operatiivinen lämpötila ottaa siis huomioon ilman lämpötilan lisäksi ympäröiviltä pinnoilta säteilevän lämmön, minkä yhteisvaikutuksesta ihmisen lämpömukavuus riippuu. Näiden laskelmien perusteella arvioidaan tarvittava lämpöteho per seinämetri, jonka perusteella valitaan asennettavien lämmityspiirien lukumäärä ja kiertoveden lämpötila.

Seinään upotetuilta vesikiertoisilta putkilta vaadittava kiertoveden lämpötila voidaan tietyissä tapauksissa arvioida suuntaa antavasti Großschmidtin luoman kuvaajan (Kuva 20) avulla. On kuitenkin huomioitava, että kyseinen kuvaaja on sellaisenaan soveltuva vain tietyin paksuisille tiiliseinille tietyissä olosuhteissa. Lämmitysputkessa virtaavan veden ja siitä saatavan tehon suhteeseen vaikuttavat muun muassa veden virtausnopeus, putken halkaisija, paksuus, materiaali ja sijainti rakenteessa sekä ulko- ja sisäilman lämpötilat. Myös seinän rakenteella, materiaaleilla ja kerrospaksuuksilla on merkitystä erityisesti siihen, kuinka suuri osa lämmitystehosta johtuu suoraan ulos. Tarkemmat arvot on laskettava tapauskohtaisesti tai arvioitava mallinnusohjelman avulla. Mitoituksessa on myös huomioitava vierekkäisten lämmitysputkien vaikutus toisiinsa. Lähekkäin sijaitsevat putket lämmittävät samaa rakennetta, jolloin vesikiertoisista putkista seinään johtuva lämmitysteho pienenee.



Kuva 20. Esimerkkikuvaaja erilaisten vesikiertoisten lämmitysputkien kiertovesien lämpötilojen suhteista niiden luovuttamaan tehoon. Kyseinen kuvaaja on tehty seuraavilla lähtöarvoilla (21): Seinän paksuus 36,5 cm; veden virtausnopeus 0,3 m/s; sisälämpötila 20 °C ja ulkolämpötila -16 °C. Kuvaajaa voidaan pitää suuntaa antavana samankaltaisissa rakenteissa.

Kuten lattialämmityksessäkin, riippuu vesikiertoisen temperierung-järjestelmän lämmönlähteen kapasiteetti erityisesti käytettävien lämmitysputkien pituudesta, paksuudesta sekä vaaditusta lämmitystehosta. Sähkölämmityskaapelilla mitoitus voidaan tehdä suoraan käytettävän kaapelin ilmoitetun tehon perusteella. Kosteuden kuivattamiseen vaadittava teho riippuu veden määrästä rakenteissa ja mahdollisen kosteuslähteen suuruudesta. Koska kuivatukseen tarvittava teho on yleisesti ottaen pienempi, voidaan vesikiertoisen kuivatusjärjestelmän putket asentaa pidempinä ja/tai ohuempina. Lämmitysjärjestelmänä käytettävän temperierung-systeemin veden lämpötilan on pysyttävä korkeampana, minkä johdosta on käytettävä lyhyempiä putkien pituuksia. Joissakin tapauksissa on myös käytettävä useampaa erillistä lämmitysputkea samassa seinässä.

Vaaditun kapasiteetin perusteella määritellään siis lämmitysputkien määrä, paksuus ja lämpötila tai sähkökaapelin teho. Yhdellä vesikiertoisella edestakaisella lämmitysputkella voidaan Großeschmidtin mukaan (21) tuottaa lämpöä jopa 100 wattia per seinämetri. Sähkökaapeleilla maksimiteho selviää valmistajan antamien tietojen perusteella.

Rakennetekniikan kannalta huomioitavaa temperierung menetelmässä voi olla upotetuille putkille tehtävän loven vaikutus rakenteiden kantavuuteen. Kantavuus voidaan varmistaa laskelmilla tai mahdolliset riskit voidaan ohittaa tekemällä lämmitysputkelle ylimääräinen kuvan 21 b (sivu 52) mukainen lista betonista tai laastista vanhan seinäpinnan päälle.

Historiallisissa rakennuksissa on suunnittelijan hyvä konsultoida myös arkkitehdin kanssa lämmitysputkien asentamisesta ja niiden vaikutuksesta huonetilojen pintojen ulkonäköön. Putkien upottaminen seinän sisälle vaatii seinärakennetta rikkovia toimenpiteitä, joka voi joissakin tapauksissa olla ei-toivottava ratkaisu, jos seinän pinta on koristeltu esimerkiksi vanhoilla seinämaalauksilla. Useimmissa tapauksissa seinä saadaan kuitenkin korjattua entisen näköiseksi asennuksen jälkeen. Seinän pinnalle asennetut lämmitysputket puolestaan vahingoittavat vanhoja rakenteita hyvin vähän, mutta jäävät helposti häiritsevästi näkyviin. Edellä mainittujen asennustapojen lisäksi putket voidaan tarvittaessa asentaa myös esimerkiksi erillisen listan sisälle. Erikoisemmissa asennusratkaisuissa tulee kuitenkin menetelmän rakennusfysikaalinen toiminta varmistaa mallintamalla tai kokemuseräisesti arvioimalla. Esimerkiksi Italiassa tehdyssä temperierung-kokeilussa oli arkkitehdin suosituksesta putket asennettu seinän alareunassa sijaitsevan puulistan taakse, mikä oli myöhemmin todettu huonoksi ratkaisuksi puun eristävän vaikutuksen johdosta (40). Ulkonäöllisten seikkojen lisäksi asennustapaan vaikuttaa olennaisesti myös haluttu toimintatapa, eli halutaanko lämpöä johtaa enemmän seinään vai huoneilmaan.

Jos menetelmää on tarkoitus käyttää vain väliaikaisena ratkaisuna, on huomioitava, että lämmittämällä kuivunut rakenne palaa tasapainokosteuteen lämmittämisen lopettamisen jälkeen. Tämä saattaa johtaa tilanteeseen, jossa käytetään huomattavia määriä energiaa rakenteissa olevan veden haihduttamiseen turhaan, kun se joka tapauksessa palaa rakenteisiin ilmankosteuden mukana. Väliaikainen kuivattaminen voi kuitenkin olla perusteltavaa tapauksissa, joissa rakenteen kastellut kosteudenlähde on muilla tavoin korjattu.

4.5.4 Materiaalivalinnat

4.5.4.1 Vesikiertoinen järjestelmä

Vesikiertoinen temperierung-järjestelmä on Saksassa toteutettu Großeschmidtin (21) mukaan tyypillisesti 12-22 mm:n paksuisilla kupariputkilla. Kupariputkien eduiksi hän laskee muun muassa suuren lämmönjohtavuuden, helpon käsiteltävyyden ja pienen lämpölaajenemiskertoimen. Toinen erityisesti suomalaisissa lattialämmitysasennuksissa yleistynyt vaihtoehto on rakenteen sisälle upotettujen muovi- tai komposiittiputkien käyttö. Koska lämmityspotkien asennukset lattioiden tai seinien pintarakenteiden sisälle eivät eroa merkittävästi toisistaan, voidaan seinän sisälle upotetun temperierung-järjestelmän asennuksessa soveltaa jo olemassa olevia lattialämmitysjärjestelmien materiaaleja ja käytäntöjä.

Tärkeää vesikiertoisen järjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa on hapen pääsyn estäminen lämmitysjärjestelmän vesikiertoon. Vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän suunnittelussa on hyvä konsultoida aiheeseen perehtynyttä LVI-asiantuntijaa ja optimoida lämmityspotkien meno- ja tulovesien lämpötilat.

4.5.4.2 Sähköinen järjestelmä

Joissakin tapauksissa voi olla perusteltavaa toteuttaa lämmitysjärjestelmä sähköisillä lattialämmityskaapeleilla. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi rakenteiden väliaikainen kuivatus. Tällöin on yleensä kuitenkin tehtävä myös muita korjaustoimenpiteitä kosteusongelman korjaamiseksi. Jos seinälämmitystä käytetään väliaikaisesti kuivattamaan rakenteet ilman kosteuden lähteeseen puuttumista, on todennäköistä, että vesi palaa rakenteisiin lämmitysjärjestelmän poiskytkemisen jälkeen.

Sähköisessä temperierung-järjestelmässä on kiinnitettävä huomiota erityisesti lämmityskaapelin tehoon sekä joissakin tapauksissa myös paksuuteen. Esimerkiksi upotettaessa lämmityspotki ohuen rappauskerroksen sisälle, on varmistettava, että kaapelin päälle jää riittävän paksu peitekerros asennuksen jälkeen. Toisaalta taas liian paksu ja eristävä peitekerros nostaa kaapeleiden ylikuumenemisen ja sitä kautta rikkoonutumisen riskiä. Joissakin saneerauskaapeleissa on kuitenkin mahdollista säädellä lämpötilaa sisäisen termostaatin avulla, jolloin ylikuumenemisen riskiä pienennetään huomattavasti.

Yleisesti sähköisiä lämmitysvastuksia on suositeltavaa käyttää vain seinään upotettuna. Lämmityskaapelin lisäksi sähköisen seinälämmityksen voi myös toteuttaa lattialämmitysmatoilla, jolloin kaapeli on asennettu valmiiksi rakenteeseen asetettavaan mattoon kiinni. Tämä helpottaa asentamista erityisesti tiheiksi suunnitelluissa lämmityskaapeliratkaisuissa. Sähköisen temperierung-lämmitysjärjestelmän kuluja voidaan joissakin tapauksissa laskea lämmittämällä rakenteita vain halvemman yösähkön aikaan. Tällöin on kuitenkin varmistettava laskelmilla tai mallinnuksilla seinärakenteen riittävä varaus, jotta yöllä lämmitetty rakenne luovuttaa lämpöä seuraavan päivän ajan.

4.5.4.3 Muut materiaalit

Lämmityspotkien tai -kaapeleiden lisäksi myös seinän materiaali vaikuttaa olennaisesti temperierung-lämmitysjärjestelmän toimintatapaan. Massiivisissa kivirakenteisissa seinissä lämpö pääsee johtumaan huomattavasti syvemmälle materiaaliin kuin esimerkiksi paksusti eristetyissä rakenteissa. Näin ollen lämpöä hyvin johtavassa seinässä lämmi-

tyskaapelin luoma lämpöä säteilevä kaistale on suurempi kuin eristävissä seinissä. Myös seinän mahdollisen pinnoitusmateriaalin lämpötekniset ominaisuudet vaikuttavat erityisesti siihen, missä suhteessa lämpöenergiaa johtuu rakenteisiin ja säteilee huoneeseen. Pintamateriaalin valinnassa on huomioitava emissiivisyyden lisäksi myös sen vesihöyrynläpäisevyys, jotta lämmityksen haihduttama vesi pääsee poistumaan rakenteista.

Yleisesti ottaen mineraalien emissiivisyydet ovat suurempia ja metallisten materiaalien pienempiä, minkä johdosta esimerkiksi kiviseinät toimivat hyvinä radiaattoreina. Myös maaleilla ja muilla pinnoitteilla voidaan nostaa huomattavasti pinnan emissiivisyyttä. Tästä johtuen näkyviin asennetut vesikiertoiset lämmitysputket on hyvä pinnoittaa suuren emissiivisyyden omaavalla maalilla. Maaleja on hyvä käyttää myös esteettisistä syistä, sillä seinän väriseksi maalatut putket myös sulautuvat paremmin taustaan. Kupariputken päällystämättä jättäminen kannattaa siis vain tilanteissa, joissa sen ei haluta luovuttavan lämpöä, kuten esimerkiksi lämmönjakohuoneesta lähtevissä siirtoputkissa. (21) Joissakin saksalaisissa kohteissa on käytetty myös muovilla pinnoitettuja kupariputkia (41).

Lämmitysputkia peittävien materiaalien ominaisuuksien lisäksi myös kerrospaksuuksilla voidaan vaikuttaa lämmön jakautumiseen rakenteen ja sisätilojen välillä. Joissakin tapauksissa voi olla toivottavaa johtaa mahdollisimman paljon lämpöä rakenteiden sisälle asentamalla ylimääräinen lämmöneriste lämmitysputken päälle huonetilan pinnalle. Tällaisessa tapauksessa on yleensä kyse rakenteiden kuivattamisesta, jolloin on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota pintamateriaalin lisäksi myös lämmöneristeen kosteustekniisiin ominaisuuksiin. Eristeenä tulisi käyttää hyvin vesihöyryä läpäisevää ja kosteutta kestävää materiaalia. Esimerkkinä tällaisesta materiaalista voitaisiin mainita muun muassa kosteusongelmaisten rakenteiden lisälämmöneristämiseen käytetyt kalsiumsilikaattilevyt. Jos lämmönlähde sijoitetaan edellä mainitun mukaisesti eristekerroksen taakse, tulee erityisesti sähköisillä lämmityskaapeleilla toteutetuissa tapauksissa huomioida kaapeleiden ylikuumentumisen mahdollisuus ja tästä johtuen arvioida asennuksen toiminta tapauskohtaisesti.

4.5.5 Asennus

Tyypillisin asennuspaikka temperierung-lämmitysputkille on ulkoseinän alareuna, mihin putket voidaan joko piilottaa seinämateriaalin sisälle tai jättää esille seinän pinnalle. Yksinkertaisin asennustapa on luonnollisesti seinän pinnalle, jolloin itse seinään tarvitsee ainoastaan porata reiät kiinnikkeille. Seinän pinnalle asennettava putki asettaa mahdollisesti kuitenkin ulkonäöstä aiheutuvia rajoituksia asennuksiin. Asennustavasta riippumatta lämpimämpi menovesiputki asennetaan yleensä seinän alareunaan ja paluuputki sen yläpuolelle (21). Seinärakenteen sisälle upotettujen putkien tapauksessa paluuputki voidaan asentaa myös ikkunalautojen alapuoliseen korkoon. Paluuputken korkeutta voidaan myös vaihdella siten, että muuten seinän alareunassa kulkeva putki nostetaan ikkunan kohdalla ikkunalaudan alle. Väliseiniin asennettaessa viedään meno- ja paluulinjat yleensä seinän eri puolilla, jolloin käännös tehdään seinän pätyyn poratun reiän kautta. Järjestelmä asennetaan väliseiniin yleensä vain maanvastaisissa rakenteissa, jolloin se ehkäisee mahdollista kapillaarista nousua ja kylmäsillan syntymistä. Ulkoseiniin järjestelmä voidaan tarkoituksesta riippuen asentaa kellarin lisäksi myös ylempiin kerroksiin. Ovet ja muut aukot voidaan alittaa esimerkiksi kynnyksen alta.

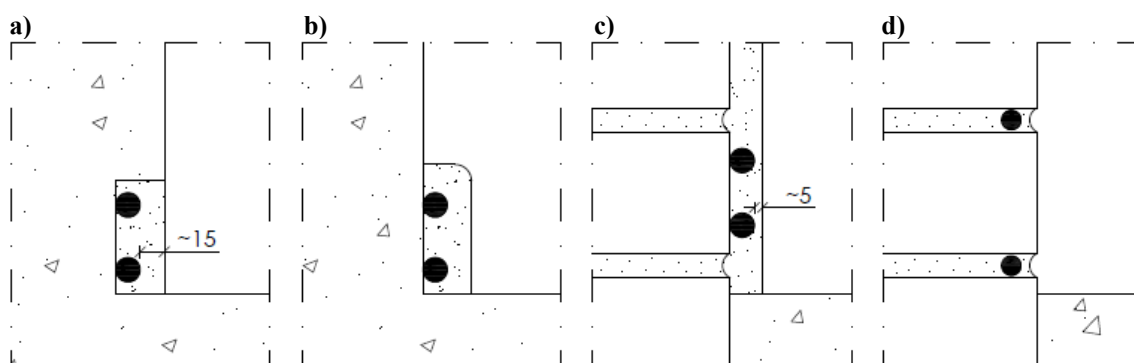
Vesikiertoisten lämmitysputkien tapauksessa on huomioitava monia samoja seikkoja kuin lattialämmityksen asennuksessa. Kupariputkia käytettäessä asennus voidaan tehdä

joko seinälinjan osuuden pituisilla suorilla putkilla ja kääntyvillä liitoksilla tai seinän muotoon taivutetuilla jatkuvilla putkilla. Kiinnitys tehdään yksinkertaisilla putkikiinnikkeillä ja liitokset mieluiten juottamalla, jotta asennus voidaan tehdä riittävän lähelle pintaa.

Temperierung-järjestelmä voidaan halutessa toteuttaa hyvin vähän rakenteita rikkovana. Yksinkertaisimmalla seinän pinnalle toteutetulla asennuksella voidaan varmistaa, että myös menetelmän poistamisen jälkeen voidaan rakenteet ja niiden pinnat remontoida helposti entiselleen.

Upotetut putket

Kuten kuvassa 21 on esitetty, voidaan seinään upotetut putket asentaa joko seinämateriaalin tai rappauksen sisälle. Historiallisissa rakennuksissa, joissa vältellään seinämateriaalin rikkomista, voidaan putki asentaa myös vanhan seinärakenteen alareunaan rappauksesta tai betonista tehtävän listan sisälle. Großesmidt suosittelee seinän tai listan sisään upotetuille putkille maksimissaan 20 mm:n laastikerrosta putken uloimman pinnan päälle. Tiiliseinissä putket voidaan asentaa pintarappauksen sisään pienemmällä peitepaksuuksilla siten, että putken uloimman pinnan päälle jää noin 5-10 mm:n paksuinen rappauskerros. Tällaisissa tapauksissa putki asennetaan ensin tiilen pintaan, jonka jälkeen seinälle levitetään putken paksuinen laastikerros ja vasta sen kuivumisen jälkeen ohut suojakerros päälle. Paljaissa tiiliseinissä lämmitysputket voidaan asentaa joko seinän pinnalle tai tiilien välisiin saumoihin. (21)



Kuva 21. Esimerkkejä erilaisista betonin tai laastin sisään asennettavien lämmitysputkien toteutustavoista. a) Seinämateriaalin sisään upotetut putket. b) Listalla peitetty putket. c) Rappauksen sisään asennetut putket. d) Tiilien välisiin saumoihin upotetut putket.

Tiilirakenteiden yleensä ohuemmissa peitepaksuuksissa on kiinnitettävä erityistä huomiota putkien kiinnikkeiden ja liitosten paksuuksiin, jotta ne eivät näy rappauksen pinnassa.

Koska vesikiertoisessa temperierung-järjestelmässä käytetään suhteellisen alhaisia kiertoveden lämpötiloja, jotka eivät itsessään vaurioita laastia, johtuu laastin mahdollinen halkeilu vain lämmitysputkien lämpölaajenemisesta. Näin ollen halkeilua voidaan ehkäistä kytkemällä vesikierto päälle ennen putkien peittämistä laastilla. Näin putkia voidaan lämmittää ja viilentää erityisesti putkien nurkkakohtien laastin kuivumisen aikana, jolloin kupariputkelle muodostuu liikkumavara laastin sisälle. Esimerkkinä riittävästä asennusvaiheen lämpölaajenemisesta on annettu 60°C:n syöttöveden saavuttaessa 45°C paluuvetenä, mihin päästään yleensä noin 10 minuutissa (42). Tätä lämpötilaa on hyvä verrata suunniteltuun käyttölämpötilaan, jotta lämpölaajenemiselle jää varmasti riittävästi tilaa. Käytettäessä laastitustyön aikaista lämmitystä, suositellaan nurkkien tasoittamista ensimmäisenä. Nurkkakohtien kuivuttua on putkille syntynyt liikkumavara, minkä jälkeen voidaan rapata myös pitkät sivut. Tapauksissa, joissa putkia ei ole mahdollista etukäteen lämmittää, voidaan halkeilu estää asentamalla eristesuikaleet jokaisen

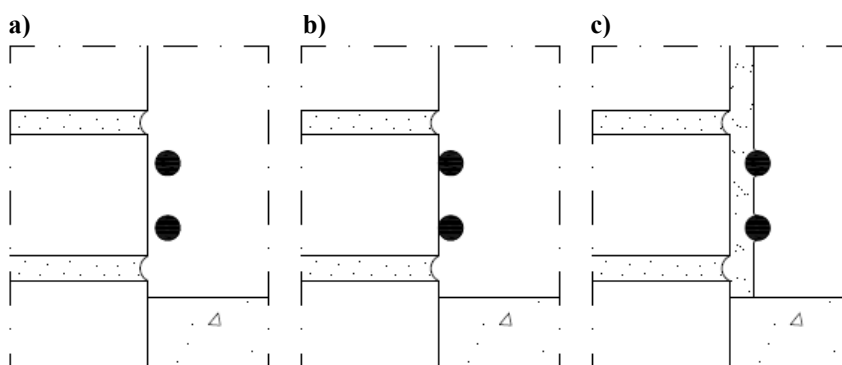
putken kulman ulkoreunaan ennen rappausta. Näin mahdollistetaan putkien pienet lämpölaajenemisesta johtuvat liikkeet. (21)

Joissakin tapauksissa voidaan lämmitysputket tai -kaapelit asentaa myös seinän ja lattian liitokseen tai lattian päällysteen alle. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi kapillaarikatkon luominen seinärakenteeseen, jonka sisäpinta on jätettävä entiselleen kulttuurihistoriallisista syistä. Tällaisissa sovelluksissa tulee menetelmän toiminta varmistaa esimerkiksi mallinnusohjelman avulla. (21)

Jos seinän ja lattian liitoksessa on puiset listat, on varsinkin lämmitysjärjestelmäksi asennettavat putket asennettava listan yläreunan yläpuolelle, jotta puulistan eristävä vaikutus minimoidaan. Kosteusongelmaisissa rakenteissa olevat puulistat ovat lähtökohdaisesti riskirakenteita. Jos listat halutaan kuitenkin säilyttää tai uusia, voidaan ne asentaa takaisin paikoilleen sitten, kun rakenteiden lämmittämisen aiheuttama ylimääräinen kosteusrasitus on tasoittunut ja seinärakenne on kuivunut riittävästi. Maanvastaisissa rakenteissa, joissa on puinen lattia, voidaan kosteustekninen toiminta varmistaa asentamalla ylimääräinen yhdensuuntainen lämmitysputki kiertämään seinälinjat lattian alla. (21)

Seinän pinnalle asennettavat putket

Seinän pinnalle näkyviin tulevat temperierung-lämmitysputket voidaan asentaa joko seinän pintaan kiinni tai jättäen rako seinän ja putken väliin. Raolla voidaan vaikuttaa menetelmän rakennusfysikaaliseen toimintaan. Seinän pinnassa kiinni oleva putki johtaa lämpöä enemmän suoraan seinään, kun taas irti oleva lämmittää huoneilmaa konvektiolla ja seinärakennetta säteilemällä. Kuvassa 22 on esitetty eri vaihtoehdot seinän pinnalle asennettavien putkien toteutustavoista. Putkien keskinäinen etäisyys voi vaihdella tapauskohtaisesti.



Kuva 22. Seinän pinnalle tulevan asennuksen erilaiset toteutustavat. a) Seinästä irti olevat putket. b) Seinän pintaan kiinni pakotetut putket. c) Osittain laastiin upotetut putket.

Yksinkertaisin tapa on asentaa lämmitysputket kiinnikkeillä irti seinästä, jolloin seinäpinnan epätasaisuuksia ei tarvitse huomioida (Kuva 21a). Jos lämpö halutaan johtaa suoraan seinään, voidaan putket myös pakottaa kiinnikkeillä seinän pintaan kiinni (Kuva 21b). Johtumispintaa voidaan lisätä täyttämällä seinän epätasaisuuksia laastilla tai upottamalla lämmitysputket suoraan seinän rappaukseen (Kuva 21c). Seinän pinnalle tulevat putket on hyvä maalata lämpösäteilyn lisäämiseksi. Maali taas on hyvä valikoida sekä huonetilaan soveltuvan värin että sen emissiivisyyden perusteella. Toimiva vaihtoehto voi monissa tapauksissa olla sama maali, jota seinässä on käytetty.

Seinän sisälle koteloon asennettavat putket

Paneloitavien putkien asennus voidaan tehdä vastaavalla tavalla kuin seinän pinnalle tehtävä asennus. Eroksi muodostuu vasta sisemmän seinälevyn asentaminen, jolloin putket jäävät uuden seinäpinnan taakse piiloon. Tässäkin tapauksessa putkien maalaaminen on suositeltavaa, jotta lämpöenergia siirtyisi putkista konvektiovirtausten lisäksi myös säteilemällä. Materiaalista riippuen ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua koteloiden levyn liiallinen kuivuminen lämmitysputken läheisyydessä, kun säteilyn nostama levyn pintalämpötila ylittää reilusti kotelon sisällä olevan ilmamassan lämpötilan. Tätä voidaan kuitenkin ehkäistä asentamalla alumiinipaperikaistaleet levyn takapinnalle lämmitysputkien kohdalle ehkäisemään intensiivisintä säteilyä. (21)

Panelointi on mahdollista tehdä myös puolikkaalle seinälle siten, että seinän yläosa jää päällystämättä. Tällaiseen ratkaisuun Großes Schmidt suosittelee paluuputken asentamista paneelin yläreunan tai siinä olevan listan yläreunan korkeudelle niin, että ylemmästä putkesta aiheutuva pieni pystysuuntainen konvektiovirtaus lämmittää myös seinän yläosaa kotelon ulkopuolella. Paluuputki voidaan asentaa joko seinän pinnalle tai rappauksen sisälle.

4.5.6 Käyttö

Kuten aikaisemmin todettua, ei sisäilman lämpötilaa mittaava lämpömittari kerro todellista koettua lämpötilaa sellaisessa huoneessa, jonka lämmittäminen perustuu lämpöä säteileviin pintoihin. Tästä johtuen temperierung-menetelmän käyttöönotossa tulisi ohjeistaa asukkaita sen toimintaperiaatteista. Näin vältetään tilanteita, joissa huoneen lämpötilaa nostetaan vain siitä syystä, että lämpömittari näyttää alhaisempia arvoja. Temperierung-lämmitysjärjestelmän varaavan ominaisuuden vuoksi on monissa tapauksissa suositeltavaa myös jättää järjestelmän säätimet piiloon, jolloin vältetään käyttäjien mahdollisilta nopeatempoisilta edestakaisilta tehonsäädöiltä. Manuaalinen säätely ilman järjestelmän tuntemusta saattaa johtaa hyvinkin vaihteleviin lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Haluttaessa mahdollisuus nopeisiin lämpötilan säätöihin, voidaan harkita rinnakkaisen patterijärjestelmän asentamista.

Lämpötilansäätelyä voidaan helpottaa myös asentamalla huonetilaan operatiivista lämpötilaa mittaava lämpömittari, joka huomioi ilman lämpötilan lisäksi myös sitä ympäröivän lämpösäteilyn vaikutuksen. Operatiivisen lämpötilan mittaamiseen soveltuvan lämpömittarin suositeltava muoto riippuu sen käyttöpaikasta. Huoneen keskellä voidaan käyttää pallon muotoista mittaria, jolloin kaikista suunnista tuleva säteily otetaan huomioon vastaavalla tavalla, kuin se vaikuttaisi samassa paikassa oleilevan ihmisen kokemaan lämpötilaan. Usein kuitenkin mittaaminen on käytännön syistä kannattavampaa suorittaa huoneen seinältä. Seinältä mitattaessa suositellaan käyttämään puolipallon muotoista lämpömittaria, jolloin mittarissa kiinni olevan seinän säteilyn vaikutus mitattuun operatiiviseen lämpötilaan minimoidaan. (43)

Temperierung-järjestelmän säätelyyn voidaan vaikuttaa olennaisesti jo suunnittelu- ja asennusvaiheessa jaottelemalla lämmityspiirit ilmansuuntien ja erilaisten rakenteiden mukaan. Näin voidaan ottaa huomioon sekä auringon lämmittävä vaikutus että seinien erilaiset lämmöneristävyydet. Alustavat säädöt on hyvä tehdä järjestelmän koekäytön yhteydessä ammattilaisen toimesta. Sekä sähköiseen että vesikiertoiseen järjestelmään on mahdollista asentaa automaattinen säätely termostaattien avulla. (38)

Temperierung-järjestelmällä varustetun rakennuksen käyttäjiä tulee ohjeistaa myös vesijohtojen tai lämmityskaapeleiden sijainneista seinillä. Tietämätön käyttäjä saattaa muuten esimerkiksi taulua asentaessaan porata seinän sisällä olevaan johtoon. Jos johdon tarkempi sijainti ei jostain syystä ole tiedossa, voidaan se tarvittaessa paikantaa esimerkiksi lämpökameran avulla.

4.5.7 Seuranta ja tiedon kerääminen

Koska kyseinen menetelmä on suhteellisen uusi Suomessa, olisi sen kehityksen ja tiedon lisäämisen kannalta hyödyllistä seurata asennettujen järjestelmien toimivuutta. Lisätietoa menetelmän toimivuudesta kaivataan myös siitä syystä, että ympäri Eurooppaa tehdyistä tutkimuksista on saatu hyvin ristiriitaista tietoa menetelmän toimivuudesta erityisesti lämmitysjärjestelmänä. Mitä enemmän seurattuja kohteita löytyy, sitä paremmin voidaan niiden toimivuutta vertailla ja selvittää minkälaisiin rakenteisiin ja olosuhteisiin menetelmä parhaiten soveltuu. Saksassa on ehdotettu myös erillistä tietopankkia, johon kerättäisiin tietoa rakennuksista, joissa menetelmää on sovellettu (22). Tämä helpottaisi huomattavasti vertailevien tutkimusten suorittamista.

Lämpötilan ja kosteuden seuraaminen onnistuu helpoiten tarkoitukseen soveltuvien loggereiden avulla. Rakenteiden sisältä tehtävät mittaukset vaativat halutulle syvyydelle porattuja reikiä, joihin asennetuilla mittauslaitteilla voidaan tarvittaessa seurata lämpö- ja kosteusolosuhteita reaaliajassa. Porareikien toteutuksessa on kuitenkin huomioitava niiden yleensä negatiivinen vaikutus huoneen pintojen ulkonäköön. Huoneilman olosuhteita mittaavat laitteet on helpompi asettaa näkymättömiin. Silloinkin on kuitenkin varmistettava, etteivät läheiset pinnat tai objektit vaikuta mittauksen tuloksiin. Temperierung-menetelmän vaikutusta seinärakenteen lämpötilajakaumaan ja seinän läpi johtuvaan hukkaenergiaan voidaan tarkastella ammattilaisen toimesta myös lämpökameran avulla.

4.6 Taloudellisuus ja ekologisuus

4.6.1 Yleistä

Temperierung-järjestelmän asennuskustannukset asuinrakennuksissa on arvioitu vastaaviksi tai joissakin tapauksissa jopa pienemmiksi kuin perinteisillä radiaattoripatterilämmitysjärjestelmillä (41, 36). On kuitenkin huomioitava, että korjausrakentamisessa kustannukset tulevat lisänä, jos rakennuksessa on ennestään ollut muunlainen lämmitysjärjestelmä. Poikkeuksena edelliseen ovat tapaukset, joissa lämmitysjärjestelmä joudutaan joka tapauksessa uusimaan. Uudisrakentamisessa puolestaan lisäkuluja ei juurikaan tule, jos patterilämmitysjärjestelmän sijasta asennetaan temperierung-lämmitysjärjestelmä. Korjausrakentamisessa asennus- ja käyttökustannuksia tulisi verrata muiden korjausmenetelmien aiheuttamiin kokonaiskustannuksiin. Yksinkertaisen lämmitysputkiston asentaminen kosteusongelmaiseen seinään on monissa tapauksissa huomattavasti edullisempaa ja helpompaa, kuin esimerkiksi rakenteiden avaaminen ja uuden vedeneristyksen asentaminen. Toisaalta temperierung-järjestelmä vaatii jatkuvasti energiaa toimiakseen.

Lisäkulujen aiheutuminen temperierung-järjestelmän asennuksen jälkeen on kuitenkin vielä kiistanalaista. Esimerkiksi Großesmidtin (21) mukaan menetelmä aiheuttaa sääteilyyn perustuvan lämmityksen ja rakenteiden kuivumisen myötä säästöjä, kun taas Lötherin (22) mukaan käyttäjän on varauduttava menetelmää käyttäessään suurempiin energiakustannuksiin. Vaihtoehtoksi energiakustannusten nousulle hän ehdottaa aurin-

kopaneelijärjestelmän asentamista energiantuotannoksi, mikä ei kuitenkaan Suomen oloissa ole kovinkaan varteenotettava vaihtoehto ainakaan ympärivuotiselle lämmitysjärjestelmälle. Aurinkoenergialla pyörivää temperierung-järjestelmää voidaan Suomessa kuitenkin harkita erikoistapauksissa, jos kyseistä lämmitystä käytetään esimerkiksi vain kesäaikaiseen kosteudenhallintaan.

Käytettäessä temperierungia kosteudenhallintamenetelmänä, kompensoituu ainakin osa käyttökuluista muiden lämmönlähteiden energiansäästöllä. Temperierung-korjausmenetelmän kustannukseksi voidaan siis laskea asennuskulujen lisäksi käyttö- sekä huoltokulut ja vähentää näistä rakennuksen lämmitysjärjestelmässä säästetyn energian kustannukset. Rakenteista haihtuvan veden johdosta menetelmän energiankulutus on yleensä suurimmillaan käyttöönoton alkuvaiheessa ja tasoittuu ajan myötä. Kapillaarikatkona toimiessaan energiankulutus myös jää hieman koholle jatkuvasti haihtuvan kapillaarisen veden johdosta.

Joissakin lähteissä (41) on tuotu esille myös temperierung-järjestelmän aikaansaamat taloudelliset säästöt siivous- ja huoltokuluissa verrattuna esimerkiksi tavanomaiseen patterilämmitysjärjestelmään. Huoltokulujen pienentymistä perustellaan muun muassa yksinkertaisemmilla säätökomponenteilla, mistä johtuen asukkaan vaikutus ja mahdolliset virhesäädöt jäävät vähemmälle. Siivouskulujen väheneminen puolestaan perustuu pienentyneiden ilmapvirtausten myötä vähentyneeseen pölyn kulkeutumiseen. Seinän sisälle upotetut lämmitysputket myös poistavat pölyn kerääntymisen pattereiden taakse.

4.6.2 Energianlähde

Energianlähteen suhteen ei temperierung-menetelmällä ole juurikaan rajoituksia. Energianlähteen valinnassa tulisi kuitenkin ottaa huomioon menetelmän käyttötarkoitus. Jos lämmitys on tarkoitettu esimerkiksi vain kosteudenhallintaan ja sitä pidetään päällä vain kesäkaudella, on energianlähteenä mahdollista käyttää esimerkiksi aurinkoenergiaa. Tämänkaltaisessa tapauksessa on myös perusteltavaa asentaa lämmitysjärjestelmä sähköisenä. Ympärivuotisen sähkölämmitteisen temperierung-järjestelmän käyttäminen on vain harvoissa tapauksissa suositeltavaa. Kuten kaikissa lämmitysmuodoissa, on lämmitykseen käytetyn energian lähde olennaisessa osassa sekä energiankulutuksen että sen ympäristövaikutusten kannalta. Suomen olosuhteissa ympärivuotiseen käyttöön on energiatehokkuuden kannalta suositeltavinta liittää temperierung-järjestelmä joko kaukolämpöverkkoon tai maalämpöpiiriin. Sähkökaapeleilla toteutettu temperierung-järjestelmä voidaan toteuttaa myös varaavana siten, että lämmitys pidetään päällä halvemman yösähkön aikaan.

4.6.3 Ristiriitaisia näkemyksiä energiansäästöstä

Suuri osa temperierung-menetelmää koskevista tutkimuksista väittää temperierung-järjestelmän olevan joko energiaa säästävää tai energiaa tuhlaava. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta juuri kukaan ei ole kyseenalaistanut energiatehokkuuden riippuvuutta kohdekohtaisista olosuhteista. Erityisesti vuonna 2004 julkaistu kattava tutkimuskokoelma *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering* (23) pitää sisällään vain menetelmän energiansäästöä tukevia julkaisuja. Tätä on myöhemmin kritisoitu muun muassa aiheesta parhaillaan väitöskirjaa tekevän Stefan Bichlmairin toimesta (29). Bichlmair tuo julkaisussaan myös esiin, ettei menetelmä ole vielä ollut tutkimustuloksia kokoavan systemaattisen tieteellisen tutkimuksen kohteena, mikä aiheuttaa epävarmuutta tutkimustiedon luotettavuuden suhteen. Menetelmän kehitys on tähän mennessä pe-

rustunut lähinnä empiiriseen tutkimustietoon. On myös huomioitava, että lähes kaikissa käytännön kokeiluissa, joissa temperierung-lämmitysjärjestelmä on todettu energiasäästäväksi, on tehty myös muita korjaustoimenpiteitä, joiden vaikutusta tuloksiin ei välttämättä ole otettu huomioon.

Luotettavaa dataa energiankulutuksesta ei siis ole mahdollista saada ilman perusteellisia vertailevia tutkimuksia, joissa temperierungin ja muiden lämmitysmuotojen kulutusta mitataan samanaikaisesti identtisissä kohteissa. Koska menetelmän asennus kohteeseen pitää usein sisällään myös muita korjaustoimenpiteitä, ovat ennen temperierung-järjestelmän asennustöitä suoritettut mittaukset usein vertailukelvottomia. Saksalaisten Kilianin, Bichlmairin ja Krusin suorittaman energiatehokkuutta vertailevan tutkimuksen (35) yhtenä lopputuloksena olikin vanhassa rakennuksessa suoritettavan vertailun vaikeus. Vaikka tutkimuskohteen huoneet olivat lähes identtisiä ja mahdollisia energiankulutuksen eroavaisuuksia pyrittiin kaventamaan muun muassa lisälämmöneristyksillä sekä ikkunoihin asennetuilla aurinkosuojakalvoilla, vaihtelivat huoneissa mitatut energiankulutukset isoimmillaan 45 % ennen vertailtavien lämmitysjärjestelmien asennusta. Tästä syystä lämmitysjärjestelmiä jouduttiin ensin vertailemaan samoihin huoneisiin asennettujen konvektoreiden energiankulutukseen ja vasta sitä kautta naapurihuoneiden muihin lämmitysjärjestelmiin.

Luotettavimpia tapoja vertailla menetelmää muihin lämmitysjärjestelmiin olisivat mahdollisimman identtiset koekohteet, joiden energiankulutukset olisi etukäteen todettu yhdenmukaisiksi. Jos temperierung-menetelmän energiankulutusta verrataan samasta tilasta aikaisemmin mitattuihin arvoihin, olisi suotavaa, ettei asennuksen yhteydessä suoritettaisi muita mahdollisesti energiankulutukseen vaikuttavia korjaustoimenpiteitä. Tällaisissa koemittauksissa on seurattava myös ulkoilman olosuhteiden muutoksia ja arvioitava niiden vaikutus mittauksittain. Esimerkiksi eri mittausvuosina saattaavat sääolosuhteet olla hyvinkin erilaiset. Mittaustavasta huolimatta, tulosten varmistamiseksi olisi myös hyvä toistaa koejärjestelyt vastaavanlaisessa kohteessa, sillä yksittäinen koekohde ei anna riittävän luotettavia tuloksia suuntaan tai toiseen. Lukuisat muuttujat (tunnetut ja tuntemattomat) vaikuttavat varsinkin olemassa olevissa rakennuksissa suoritettujen kokeiden tuloksiin. Menetelmästä on myös sovellettu ja on sovellettavissa lähes rajattomasti erilaisia variaatioita, joiden keskinäinen vertailu on hyvin hankalaa. Käytännössä jokainen temperierung-järjestelmä on yksilöllinen. Edellä mainituista syistä johtuen debattia ei voida ratkaista yksittäisten koemittausten perusteella.

4.6.4 Energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä

On fakta, että seinärakenteen sisälle asennettava lämmönlähde johtaa enemmän energiaa seinärakenteen läpi ulospäin kuin seinästä irti oleva lähde. Tämä johtuu siitä, että seinään upotetussa putkessa seinän sisäpuolinen lämmönvastus toimii ikään kuin väärään suuntaan eristäen lämmönlähdettä sisäilmasta. Tämän lisäksi lämmityspotken ja ulkoilman väliin jäävä eristävä seinäkerros on ohuempi kuin sisätilojen ja ulkoilman välinen. Seinärakenteen sisälle johdettu lämpöenergia kuitenkin vaikuttaa rakenteen kosteustasapainoon, mikä puolestaan on suoraan yhteydessä rakenteen lämmönjohtavuuteen. Rakennusmateriaalin ominaisuuksista ja lähtökosteudesta riippuu, miten paljon kuivuminen vaikuttaa seinän U-arvoon. Mitä enemmän rakenteessa on kosteutta, sitä enemmän sen lämmittämisellä ja kuivattamisella voidaan parantaa sen lämmöneristävyyttä. Jos seinän rakenteet ovat jo valmiiksi suhteellisen kuivia, jäävät muutokset lämmönjohtavuuksissa pieniksi. Koska materiaalin lämpeneminen ilman kosteuspitoisuuden muutoksia lisää sen lämmönjohtavuutta (10), voi joissakin tapauksissa rakenteiden lämmittämi-

sen aiheuttama muutos olla jopa negatiivinen. Jos taas seinä on ollut läpimärkä esimerkiksi kapillaarisen kosteuden nousun johdosta, voi positiivinen vaikutus olla huomattavan suuri. WUFI® 2D -ohjelmalla suoritettujen mallinnusten perusteella energiaa säästävä vaikutus ei voi kuitenkaan perustua pelkästään kuivuneen materiaalin lämmöneristyskyvyn paranemiseen.

Kuivattamisen lisäksi temperierung-menetelmän energiaa säästäväksi vaikutukseksi voidaan laskea myös huoneen sisäilman lämpötilan alentaminen. Huoneilman lämpötila voidaan siis pitää seinistä tulevan lämpösäteilyn vuoksi matalampana ilman, että ihmisen kokema lämpöviihtyvyys muuttuu. Tästä johtuen vähenevät sekä ilmanvaihdon että mahdollisten rakojen, avonaisten ovien ja ikkunoiden aiheuttamat energiahäviöt, kun ulos karkaava sisäilma sisältää vähemmän lämpöenergiaa. Rakenteiden kuivumisen ja säteilyyn perustuvan lämmityksen yhteisvaikutus on siis yleisin perustelu menetelmän energiaa säästävälle vaikutukselle.

Uusimpien tutkimusten (35) mukaan yksinkertaisella seinän alareunaan asennetulla temperierung-menetelmällä ja tavanomaisemmalla seinälämmityksellä on huomattava ero energiankulutuksen suhteen. Siitä johtuen temperierung-lämmitysjärjestelmä vaatii lisätutkimuksia energiankulutuksen kannalta erityisesti optimaalisimman asennustavan suhteen. On siis mahdollista, että tämä optimaalisin asennustapa voi olla tavanomainen koko seinän alalle asennettu seinälämmitysjärjestelmä. Se tarkoittaisi, että yksinkertaista seinän alareunaan asennettavaa temperierung-järjestelmää kannattaisi käyttää vain kapillaarisen kosteuden nousun tai muiden kosteusongelmien ehkäisyyn. Myös lämmityspotkien sijoittaminen rakenteen sisä- tai ulkopuolelle vaikuttaa lämmön jakaantumiseen ja näin ollen vaatii lisätutkimuksia energiankulutuksen osalta.

Osaltaan energiankulutukseen vaikuttaa myös asennetun temperierung-järjestelmän käyttötapa ja -tarkoitus. Ympärivuotiset vakio-olosuhteet vaativat enemmän energiaa, kuin esimerkiksi ulkoilman olosuhteiden mukaan liukuva sisäilmasto. Liukuvalla sisäilmastolla tarkoitetaan siis lämpö- ja kosteusolosuhteita jotka vaihtelevat hitaasti ulkoilman lämpötilan ja kosteuden mukaan. Liukuva ilmasto voidaan asettaa vaihtelemaan tietyissä rajoissa, jotta olosuhteet eivät muuttuisi liikaa mahdollisten ulkona vallitsevien ääriolosuhteiden mukaan.

Jos rakennusosien lämmitystä käytetään kosteusongelmien ehkäisyyn tai rakenteiden kuivattamiseen, voidaan järjestelmän suunnitteluvaiheessa arvioida, onko jatkuva lämmitys tarpeellinen vai riittääkö kriittisten vuodenaikojen aikana tapahtuva lämmittäminen ehkäisemään ongelmat. Rakenteita kuivatettaessa on huomioitava veden haihtumisen vaatima suuri energiamäärä, joka viilentää ympäröiviä rakenteita ja näin ollen lisää lämmityksen energiankulutusta. Kapillaarikatkona käytettäessä energiaa kuluu siis jatkuvasti maaperästä nousevan veden haihduttamiseen. Haihduttamiseen käytetty energia on suurimmillaan yleensä asennusvaiheessa, jolloin rakenteisiin saattaa olla varastoituneena hyvinkin suuria määriä vettä. Rakenteiden kuivuessa kosteuden haihduttamiseen kuluva energiamäärä vähenee, jolloin ”ylimääräinen” lämpöenergia vapautuu rakennuksen lisälämmöksi.

Kirkoissa ja muissa korkeissa tiloissa energiansäästöjä on mahdollista saada kohdistamalla lämmitys ihmisten oleskelualueelle koko korkean ilmamassan lämmittämisen sijasta. Tällaisesta kohteesta on esimerkkinä Sacro Cuore kirkko Monzassa, missä lämmityskuluja saatiin suunnittelijan Thomas Beckerin mukaan pienennettyä kohdennetun temperierung-järjestelmän avulla (40). Tällaisessa tapauksessa kohdennetun säteily-

lämmityksen ideana on siis minimoida lämpimän ilmamassan karkaaminen rakennuksen korkeimpiin osiin.

Edellä käsiteltyjen energiankulutukseen vaikuttavien seikkojen lisäksi myös kohteen rakenneratkaisuilla on merkitystä. Esimerkiksi vanhat massiivikivitalot eroavat rakennusfysikaalisilta ominaisuuksiltaan huomattavasti uudemmista kevytrakenteisemmista asuinrakennuksista. Rakenteiden kannalta olennaisimpia ovat siis seinärakenteen rakenneratkaisut, materiaalit ja massiivisuus. Esimerkiksi hyvin eristetyissä rakenteissa kosteuden vaikutus rakenteen U-arvoon on yleensä vähäisempi kuin yksinkertaisessa massiivitiiliseinässä (11). Tästä syystä menetelmää on kehitetty ja testattu enimmäkseen juuri historiallisissa huonosti eristetyissä kivi- tai tiilirakennuksissa.

Yksittäisen rakennuksen mittaustulokset saattavat myös antaa vääristyneitä tuloksia, jos lämmitysjärjestelmä on esimerkiksi suunniteltu tai asennettu väärin. Myös menetelmän käyttötavat vaikuttavat olennaisesti energiankulutukseen, jos esimerkiksi sisäilman lämpötilaa säädellään edestakaisin tai sen teho asetetaan ainoastaan lämpömittarin lukeman perusteella ottamatta huomioon noussutta operatiivista lämpötilaa.

4.7 Esimerkkikohteita

Temperierung-menetelmää on käytetty pääasiassa vanhojen kivirakenteisten rakennusten restaurointiin. Tässä kappaleessa esitellään kolme tyypillistä kohdetta, joissa menetelmää on käytetty joko kosteusongelmien korjaamiseen tai tutkittu sen toimivuutta lämmitysjärjestelmänä. Lämmitysjärjestelmänä tutkituista kohteista esitellään yksi, jossa on päädytty menetelmän energiatehokkuuden kannalta positiivisiin tuloksiin ja toinen, jossa sen energiatehokkuus kyseenalaistetaan.

4.7.1 Suomenlinnan kosteusvauriokorjaukset

Suomenlinnassa on kahdessa rakennuksessa sovellettu kokeilumielessä temperierung-tyyppistä seinälämmitysmenetelmää vanhojen massiivitiiliseinien kosteusongelmien korjaamiseen. Rakennukset altistuvat sijaintinsa vuoksi suurelle viistosaderasitukselle erityisesti loppuvuodesta, mikä lienee ainakin osasyynä havaituille kosteusvaurioille.

4.7.1.1 Rakennus C 58

Suomenlinnan itälaidalla sijaitseva vuodelta 1877 peräisin oleva C 58 -rakennus toimi ensimmäiset vuosikymmenet saaren muonavarastona. Vuonna 1920 tapahtuneen tulipalon jälkeen rakennus muutettiin korjausten yhteydessä asuinrakennukseksi. 2000-luvulla rakennuksen peruskorjauksen yhteydessä havaittiin erityisesti toisen kerroksen eteläpuoleisen päätyasunnon ulkoseinässä suuria kosteuspitoisuuksia sekä hometta jälkikäteen asennetun sisäpuolisen lisälämmöneristyksen takana. Samassa asunnossa on aiemminkin tehty kosteusvaurioiden korjauksia, eikä vuotoja tai muuta selvää kosteudenlähdetä löytynyt. Kosteusongelmien arvioitiin voivan johtua ainakin osittain tulipalon aiheuttamista muutoksista tiilien ominaisuuksissa, sillä ongelmia on esiintynyt vain toisen kerroksen asunnoissa. Myös peruskorjauksen yhteydessä tehtyjen mallinnusten perusteella kyseisen seinärakenteen pitäisi olla ympärivuotisessa tarkastelussa toimiva. Maaliskuussa 2007 rakennuksen toisen kerroksen eteläpäädyn asunnon etelä- ja itäseinän nurkkaan asennettiin koemielessä arviolta 6 m²:n pinta-alalle temperierung-tyyppinen seinälämmitys. Sähkölämmitteiset kaapelit asennettiin tiilimuurauksen sisäpuolisiin saumoihin laastikerroksen alle. (44)

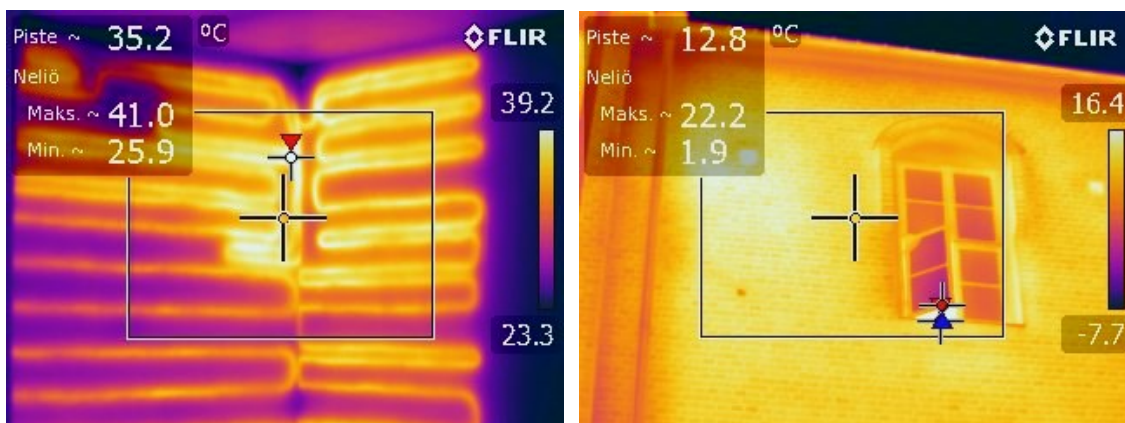


Kuva 23 (vasemmalla). Suomenlinnan C 58 rakennuksen päätyasunnon nurkka, missä lämmityskaapelit sijaitsevat erisävyisenä näkyvän laastikerroksen alla.



Kuva 24 (oikealla). Lämmityskaapeleiden asennus tiilisaumoihin. (37)

Suomenlinnan hoitokunnan rakennuttaja-arkkitehti Petri Mikonsaaren (27) mukaan kosteudenhallinta on toiminut menetelmällä hyvin. Haittapuolena on kuitenkin asunnon liiallinen kuumuus erityisesti kesäkuukausina sekä jatkuvan sähkölämmityksen energiankulutus. Jo huhtikuuisella kohdevierailulla 6.4.2017 huone oli aistinvaraisesti tarkasteltuna selvästi lämpimämpi kuin saman huoneiston muut huoneet. Lämpökameralla mitattuna lämmitetyt seinäpinnat olivat noin 30-40 °C. Lämmittämättömät pinnat samassa huoneessa olivat noin 20-22 °C ja nurkat hieman tätä viileämpiä. Auringon lämmittävän vaikutuksen johdosta ulkopuolinen tarkastelu lämpökameralla onnistui vain jo varjon puolella olleesta itäseinästä. Seinälämmityksen kohdalta seinän ulkopinnan maksimilämpötilaksi saatiin 18,6 °C. Lämmittämättömissä kohdissa ulkopinnan lämpötila oli noin 12-13 °C. Mittausajankohtana oli aurinkoinen iltapäivä ja ilman lämpötila oli Forecan tietojen (Harmajan majakalla) mukaan noin 4 °C (45).



Kuva 25 (vasemmalla). Seinälämmitys sisäpuolelta. Laastin alla olevat lämmityskaapelit erottuvat selvästi lämpökameran kuvissa. Ero lämmittämättömään seinäpintaan oli noin 10-20 °C.

Kuva 26 (oikealla). Seinälämmitys ulkopuolelta. Lämmityskaapelit sijaitsivat ikkunasta vasemmalla näkyvän lämpimän alueen kohdalla. Lämmitetyn ja lämmittämättömän seinän lämpötilaero oli ulkopinnalla noin 5-10 °C.

4.7.1.2 Rakennus C 49

Myös rakennuksen C 49 eteläpään makuuhuoneeseen on kahtena eri vuonna tehty kaksi erilaista sovellusta temperierung-menetelmästä sekä kosteusvaurioiden että seinästä hohkavan kylmyyden johdosta (37). Kyseessä on yksikerroksinen rakennus, jonka ulkoseinät ovat kahden kiven paksuisia tiiliseiniä. Tiilirakenteen alla on luonnonkivistä muurattu matala sokkelirakenne. Arvioiden mukaan seinää rasittavat viistosateet ja maasta nouseva kosteus. Rakennus on erityisen altis alueella vallitseville lounaistuulille (46) ja niiden mukaan suuntautuville viistosateille sekä merellisen sijaintinsa että talosta lounaaseen suuntautuvan avoimen maaston johdosta.



Kuva 27 (vasemmalla). Rakennuksen C 49 eteläpääty on avoin mereltä tuleville tuulille ja sateille.

Kuva 28 (oikealla). Rakennuksen C49 eteläpään rappauksen vaurioita. Julkisivua ei kuitenkaan ole korjattu lämmityskaapeleiden asentamisen jälkeen, joten pinnan vaurioiden iästä ei ole varmuutta.

Ensimmäinen vuonna 2007 asennettu seinälämmitys (Kuva 29) toteutettiin 20 W/m tehoisella lämmityskaapelilla, joka sijoitettiin makuuhuoneen lännen suuntaisen seinän tiilimuurausten saumoihin. Tämä ei kuitenkaan poistanut lattiapinnan alta nousevan kosteuden aiheuttamia haittoja, minkä johdosta kyseiseen huoneeseen asennettiin vielä vuonna 2014 ulkoseinät lattianrajassa edestakaisin kiertävä lämmityskaapeli (Kuva 30).



Kuva 29 (vasemmalla). Rakennuksen C 49 eteläpäädyn makuuhuoneen länsiseinän lämmityskaapeli. (37)

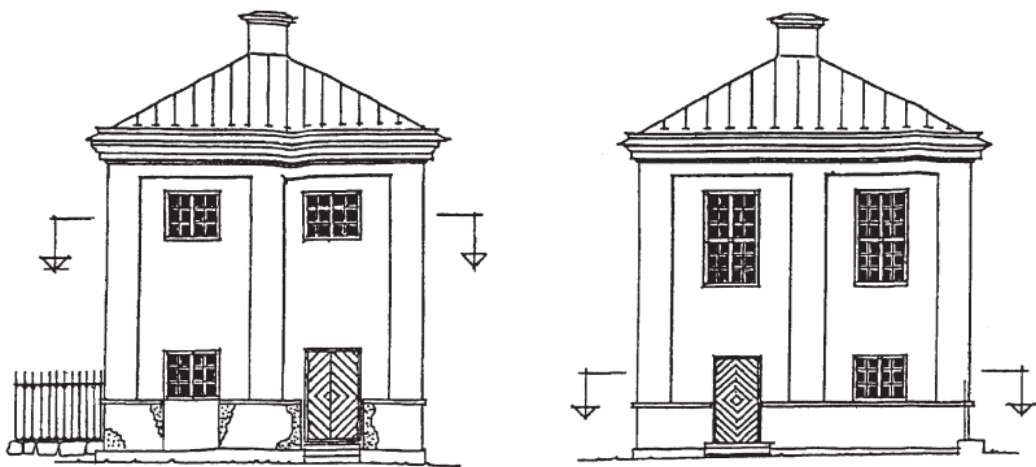


Kuva 30 (oikealla). Rakennuksen C 49 eteläpäädyn makuuhuoneen ulkoseinät kiertävä lämmityskaapeli. Kaapeli on asennettu kahdelle korkeudelle, joista alempi on lattiapinnan tasossa ja ylempi tiilien saumanvälin verran ylempänä. (37)

Suoraan vertailtavissa olevia käyttäjäkokemuksia huoneesta ei ole, sillä ennen kaapeleiden asennusta huoneistossa asuneet eivät olleet halukkaita muuttamaan takaisin remontin jälkeen. Uudet asukkaat ovat kuitenkin olleet erittäin tyytyväisiä ja sisäpuoliset seinäpinnat ovat asennusten jälkeen pysyneet kuivina, joten ainakin pahimmat kosteusongelmat on saatu korjattua kyseisellä menetelmällä. Lämmityksen vaikutuksesta tiiliseinän ulkopintaan ei ole havaintoja, sillä kuvassa 28 näkyviä seinän ulkopinnan rapautumisvaurioita ei ole korjattu kaapeleiden asentamisen jälkeen. (37)

4.7.2 Salstan linnan energiankulutusvertailu

Ruotsissa Uppsalan lähistöllä sijaitsevassa Salstan linnassa tutkittiin 2000-luvun vaihteessa temperierung-menetelmän energiankulutusta pohjoisessa ilmastossa. 1600-luvulta peräisin olevan linnan pihalla sijaitsee kaksi lähes identtistä paviljonkirakennusta, joissa suoritettiin vertaileva käytännön tutkimus kahden erilaisen lämmitysjärjestelmän välillä. Vertailtavat lämmitysjärjestelmät olivat temperierung-järjestelmä itäisessä paviljongissa ja konvektioon perustuva patterilämmitys läntisessä paviljongissa.



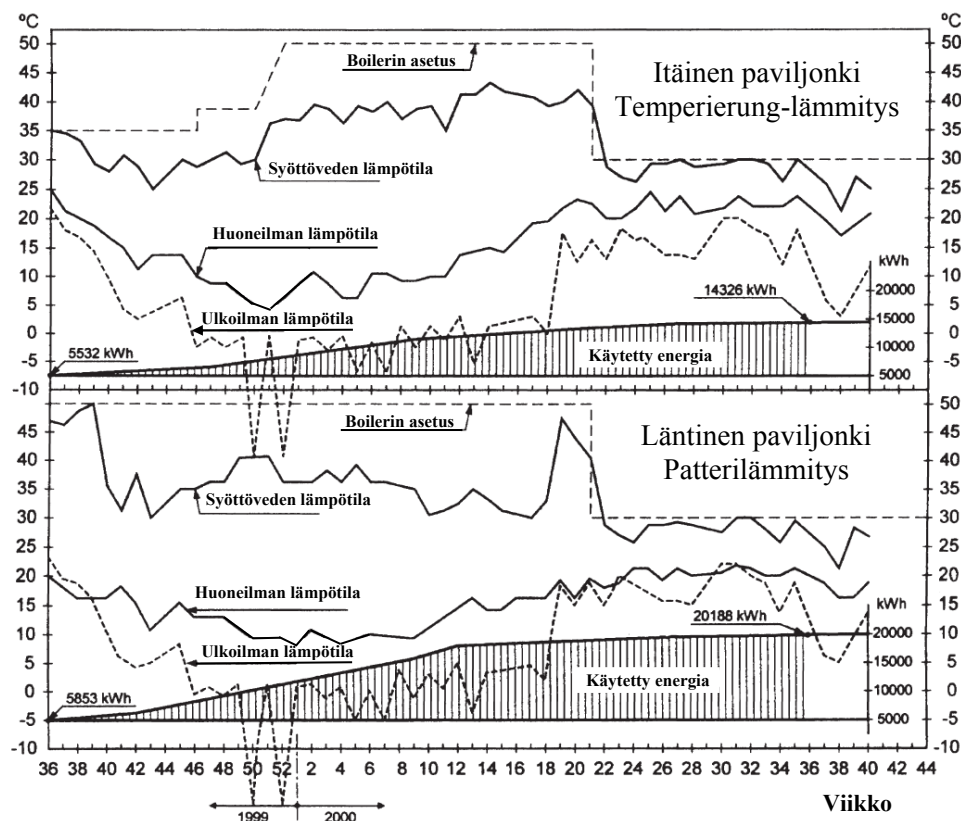
Kuva 31. Salstan linnan läntinen (vasemmalla) ja itäinen paviljonki. Muuten lähes identtisten rakennusten rakennusfysikaalisesti merkittävimmät erot ovat erikokoiset ikkunat. (24)

Kyseiset paviljonkirakennukset koostuvat graniittiperustusten päällä olevista 0,5 - 0,8 metrin paksuisista tiiliseinistä. Kuten kuvasta 31 voi nähdä, ovat suurimmat erot pavil-

jonkirakennuksien ikkunoissa. Tutkimusta varten tehdyissä laskelmissa itäisen paviljongin todettiin tarvitsevan noin 7 % enemmän lämmitysenergiaa -17°C :n lämpötilassa, mikä otettiin huomioon energiankulutuksen tulosten vertailussa. Lämmitysjärjestelmiä asennettaessa tarkoituksena oli pitää molemmat rakennukset 15°C :n lämpötilassa.

Salstan linnan itäisen paviljongin temperierung-järjestelmä toteutettiin kahdella 18 mm:n paksuisella kupariputkilinjalla, jotka asennettiin kiertämään ulkoseinät molemmissa kerroksissa 10 ja 20 cm:n korkeudella lattiapinnasta 20 mm:n syvyydellä rappauksen alla. Syöttöveden lämpötila vaihteli vuodenaikojen mukaan sekä temperierung-että patterilämmitysjärjestelmässä $30 - 50^{\circ}\text{C}$:n välillä.

Tutkimus sisälsi vuoden kestäneet lämpötila- ja kosteusmittaukset useista kohdista rakenteiden sisältä sekä ulko- ja sisäilmasta. Näiden lisäksi mitattiin molempien rakennusten lämmitysenergian kulutusta. Paviljongien energiankulutukset ja tutkimuksen kannalta olennaiset lämpötilat on esitetty kuvassa 32. Huomionarvoista kuvaajassa on, että 30 % pienemmällä energiankulutuksella selvinneessä itäisessä paviljongissa sisäilman lämpötila vaihteli mittausjaksolla enemmän ja oli kylmimmillään noin 5°C matalampi kuin läntisessä paviljongissa. Kun energiankulutus laskettiin vallitsevan sisälämpötilan mukaan, oli tuloksena 18 % pienempi kulutus temperierung-menetelmällä varustetussa itäisessä paviljongissa. Tuloksena saadun pienemmän energiankulutuksen todettiin Holmbergin julkaisussa viittaavan noin 25 %:n pienenemiseen tiiliseinän lämmönjohtavuudessa.



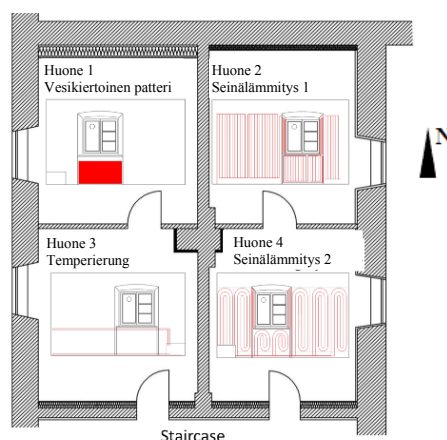
Kuva 32. Salstan linnan itäisen ja läntisen paviljongin energiankulutusten vertailu. (24)

Salstan linnan positiivisista tuloksista huolimatta, on huomioitava sen olevan vain yksittäinen koekohde ilman uudelleen toistettuja mittauksia. Jotta menetelmän todellinen energiatehokkuus selviäisi luotettavasti, tarvittaisiin tämänkaltaisia tutkimuksia lisää sekä erilaisilla rakenteilla että erilaisissa ilmasto-olosuhteissa. Yksittäistä tutkimusta

voidaan pitää suuntaa antavana, mutta lukuisten mittaustuloksiin vaikuttavien muuttujien ja rakennusten pienten eroavaisuuksien johdosta lopullisten johtopäätösten vetäminen on vielä ennenaikaista.

4.7.3 Benediktbeuernin luostarin energiankulutusvertailu

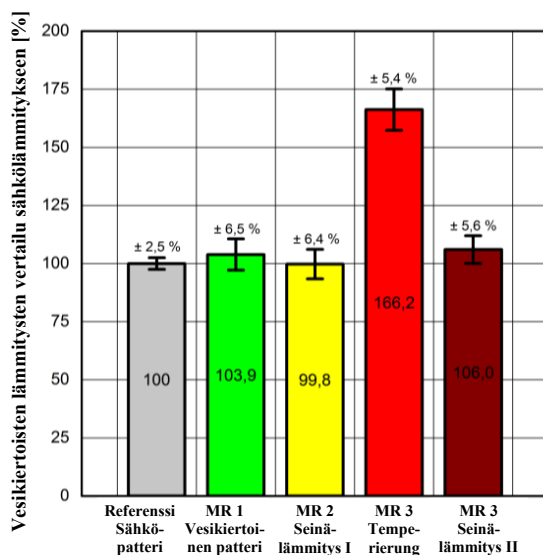
Tuorein saatavilla oleva temperierung-menetelmän energiatehokkuutta käsittelevä julkaisu on Saksassa vuonna 2016 julkaistu tutkimus, jossa vertailtiin keskenään neljää erilaista vesikiertoista lämmitysjärjestelmää Benediktbeuernin luostarissa. Kuvassa 33 näkyvän 1760-luvulta peräisin olevan rakennuksen neljässä suhteellisen samanlaisessa huoneessa mitattiin temperierung-menetelmän lisäksi kahta erilaista seinälämmitystä sekä tavanomaista patterilämmitystä. Tutkimusjakson ajaksi huoneiden ilman lämpötilat säädettiin samoiksi. (35)



Kuva 33. Benediktbeuernin luostarin osa, jossa energiankulutusvertailun koekäytössä olleet huoneet sijaitsevat. (35)

Huoneessa 1 oli seinärakenteesta irti asennettu vesikiertoinen patterilämmitys, josta lämpö siirtyi pääasiassa säteilemällä huonetilaan. Huoneeseen 2 oli laastikerroksen sisälle asennettu vesikiertoinen seinälämmitys, jonka taakse oli lasikuitumaton avulla luotu kahden senttimetrin paksuinen eristävä ilmarako. Huoneeseen 3 oli asennettu kahdella vesikiertoisella kupariputkella toteutettu temperierung-lämmitysjärjestelmä. Toinen edestakainen putki kulki seinän alareunassa ja toinen ikkunoiden alareunan korkeudella. Toinen versio koko seinän kattavasta seinälämmityksestä toteutettiin savilaastista esivalmistettujen elementtien sisälle asennetuilla lämmitysputkilla huoneeseen 4.

Edellä mainittujen lämmitysjärjestelmien lisäksi kaikkiin huoneisiin asennettiin vertailun vuoksi sähköiset lämmittimet. Pelkillä sähkölämmittimillä suoritettut mittaukset osoittivat, että huoneiden energiankulutuksessa oli suuriakin eroja. Tästä syystä jokaista lämmitystapaa verrattiin ensin samassa huoneessa mitattuun sähkölämmityksen kuluutukseen ja vasta sen kautta toisten lämmitysjärjestelmien kulutuksiin. Näin huoneiden eroavaisuuksien vaikutusta mittaustuloksiin saatiin ainakin osittain eliminoidua. Ilmanvaihto oli asetettu samalle tasolle jokaiseen vertailtavaan huoneeseen.



Kuva 34. Benediktbeuernin luostarin energiankulutusvertailun tulokset sähkölämmitykseen verrattuna prosenttilukuna ilmoitettuna. Pylväät vasemmalta alkaen ovat vertailuna käytetty sähköinen patterilämmitys, vesikiertoinen patterilämmitys, seinälämmitys I, temperierung-lämmitys ja seinälämmitys II. (35)

Tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla eri menetelmistä aiheutuvaa lämpövirtaa samanlaisen ulkoseinän läpi. Kuvassa 34 esiteltujen tulosten perusteella temperierung-järjestelmä kulutti noin 1,5 kertaa enemmän energiaa kuin muut lämmitystavat, joiden kulutukset olivat keskenään samaa suuruusluokkaa. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella temperierung-menetelmän toteutustapoihin tulisi kiinnittää enemmän huomiota ja selvittää millainen asennus on optimaalisin kuhunkin kohteeseen. Lämmitysjärjestelmänä menetelmän laajentamista koko seinän kattavaksi seinälämmitykseksi tulisi myös tutkia enemmän.

Temperierung-järjestelmän energiankulutuksesta huolimatta tässäkin julkaisussa kuitenkin todetaan menetelmän soveltuvan monissa tapauksissa kosteusongelmien ehkäisyyn. (35)

4.8 Mahdollisia käyttökohteita

Temperierung-menetelmää on siis mahdollista käyttää lämmitys-, sisäilmastonhallinta- tai kosteudenhallintajärjestelmänä. Kosteudenhallintaan käytettäessä potentiaalisimpia korjauskohteita ovat erityisesti kellaritilat, joissa maaperästä nouseva kosteus kastelee rakenteita ja muilla tavoin tilan lämmittäminen tai kuivana pitäminen on osoittautunut hankalaksi. Kellaritiloissa käyttökohteina voisivat olla esimerkiksi portaiden alustilat ja muut ahtaat paikat, joissa on puutteellisen lämmityksen ja ilmanvaihdon johdosta lisääntyntä kosteusrasitusta.

Temperierung-lämmitysjärjestelmää voidaan monissa paikoissa käyttää myös puolilämpimien tilojen, kylmäsiltojen tai ikkunoiden ympäristön lämmittämisessä ja kosteudenhallinnassa. Esimerkiksi sisäänkäyntien yhteydessä olevien tuulikaappien seinien alaosissa on usein havaittavissa maali- ja rappausvaurioita, jotka saattavat johtua tilan ja rakenteiden viileyden aiheuttamasta kosteuden kondensoitumisesta sekä joskus myös tiilirakenteen ulkopuolisesta kosteusrasituksesta. Vastaavasti myös ikkunoiden liittymissä voi tapahtua rakenteen jäähtymistä siinä määrin, että niissä voi esiintyä paikallisia kondensaation aiheuttamia pintavaurioita. Joissakin kohteissa osa ikkunoista altistuu

myös runsaalle viistosaderasitukselle. Ulkopinnaltaan suojelluissa ja ulkopuolen karmi-liittymiltään tiivistämättömissä kohteissa tämä voi pahimmillaan johtaa karmin tilkevä-lin vesivuotojen kautta ikkunanpielien rakenteiden kastumiseen ja edelleen pinnoitevau-rioihin. Temperierung-menetelmällä on mahdollista edesauttaa myös tällaisten ajoittain ongelmana olevien rakenteiden kuivana pitämistä.

Menetelmä soveltuu hyvin myös väliaikaiseen kuivatukseen vesivuotojen tai esimerkik-si tulipalon sammutustöiden kastelemissa rakenteissa. Tällaisissa tapauksissa sähkö-lämmitteiset saneerauskaapelit voidaan asentaa joko väliaikaisesti tai pysyvästi raken-teisiin ja kytkeä pois päältä rakenteen kuivuttua. Erityisesti massiivisissa rakenteissa lämpö johtuu näin huomattavasti syvemmälle materiaaliin kuin perinteisemmillä ilma-virtaan perustuvilla vesivahinkojen kuivausmenetelmillä. Rakenteen sisään asennettu kuivatusjärjestelmä mahdollistaa tilan nopeamman korjaamisen ja takaisin käyttöön ottamisen. Tavanomaisilla kuivatusmenetelmillä voi pahoin kastuneen tiilirakenteen kuivattamiseen kulua vuodenajasta riippuen jopa kuukausia, mistä voi koitua merkittä-vää haittaa tilan käyttäjille.

Joissakin vanhoissa rakennuksissa on myös yhtenäisiä ikkunattomia huonosti eristettyjä massiiviseiniä, joiden läheisyydessä voi etenkin talvikaudella olla aistittavissa asumis-viihtyvyyden raja-arvot alittavia lämpötiloja. Lämpöolosuhteita on pyritty tyypillisesti parantamaan lisälämmittimillä tai lisäämällä kyseessä olevalle seinälle sisäpuolinen lisälämmöneristys. Temperierung-menetelmä soveltuu myös tällaisten, lähinnä talvikau-sina esiintyvien ongelmien korjaamiseen.

Energiankulutuksen ristiriitaisuuksista huolimatta temperierung-lämmitysputkia voi-daan perustellusti käyttää myös lämmityspattereiden korvaamiseen ahtaissa paikoissa tai tiloissa, joissa seinäpinnat halutaan vapaiksi esimerkiksi sisustamista varten. Lämmi-tysputkien upottaminen rakenteen sisälle jättää siis seinän pinnan tyhjäksi ja mahdollis-taa näin lähes vapaan kalusteiden sijoittelun. Kalusteiden ja seinän väliin Großesmidt kuitenkin suosittelee 15-20 mm:n rakoa, jotta lämpöenergia pääsee leviämään konvek-tiovirtauksen mukana paremmin myös seinän yläosiin (21). Pattereiden poistamisen tuoma pieni tilanlisäys voi kuitenkin olla merkittävä esimerkiksi hätäpoistumistien tai muun ahtaan käytävän tapauksessa.

5 Mallinnukset

Tämän työn mallinnukset on pyritty tekemään mahdollisuuksien mukaan oikeita tilanteita vastaaviksi. Joissakin tapauksissa rakenteita jouduttiin kuitenkin yksinkertaistamaan liian suuriksi kasvaneiden tiedostokokojen takia. Yksinkertaistukset pyrittiin kuitenkin tekemään niin, ettei niillä ole merkittävää vaikutusta rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymisen kannalta. Työn mallinnukset suoritettiin pääasiassa jo olemassa oleville rakenteille, mikä on huomioitava myös tulosten tarkastelussa. Vanhojen rakenteiden mallinnus asettaa epävarmuuksia muun muassa materiaalien vaihtelevan kunnon ja mahdollisten rakojen tai vuotokohtien johdosta. Joissakin tapauksissa voi myös olla hyvin vaikea selvittää, onko vanhat rakenteet toteutettu olemassa olevien suunnitelmien mukaisesti.

Mallinnuksissa käytettyjen materiaalien tiedot on otettu WUFI®:n tietokannoista siten, että niitä on varmuuden vuoksi verrattu Suomen Standardisoimisliiton (47) määrittämiin arvoihin. Jos kyseisten tietokantojen tarjoamat arvot ovat poikenneet olennaisesti toisistaan, on käytetty Suomen Standardisoimisliiton arvoja.

Lämmitysputkien mallintaminen voidaan suorittaa WUFI® 2D -ohjelmassa joko erillisenä lämmönlähteenä tai määrittämällä rakenteen sisälle putken poikkileikkausta vastaava tyhjä alue, jonka raja-arvoiksi asetetaan haluttu lämpötila. Myös WUFI®:n oman lämmönlähteen käyttö edellyttää lämmitysputken poikkileikkauksen muodostamista sillä erotuksella, että lämmityksen teho syötetään mallinnettuun poikkileikkaukseen watteina per metri (W/m).

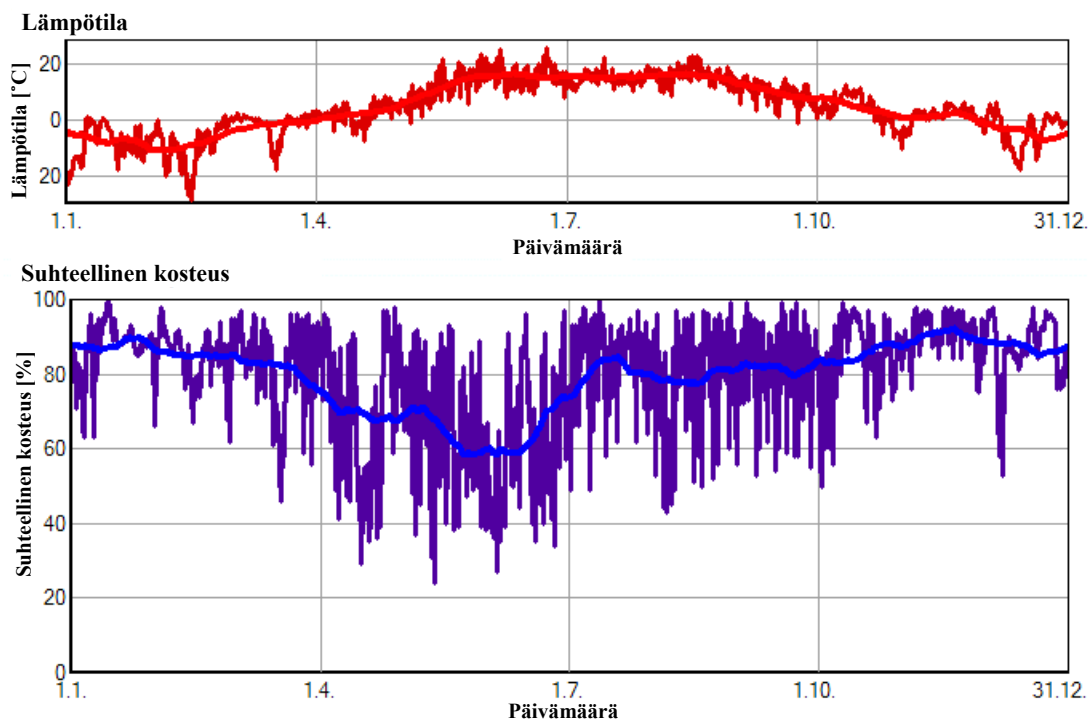
Mallinnuksia tehtiin erilaisista tapauksista, joissa temperierung-menetelmää on mahdollista käyttää kosteusongelmien korjaamiseen. Osa mallinnuksista kuvaa todellisia kohteita ja osa teoreettisia tilanteita. Pääpaino oli seurata lämmön sekä erityisesti kosteuden jakautumista lämmitetyssä rakenteessa. Kaikki mallinnukset suoritettiin tilanteille, joissa lämmitysputki on upotettu seinärakenteen sisälle.

5.1 Lähtötiedot

Mallinnusohjelmia käytettäessä ovat lähtötiedot olennaisessa asemassa tulosten luotettavuuden kannalta. Tässä kappaleessa on esitetty mallinnuksissa käytettyjen erilaisten reunaehtojen olosuhteet.

Ulkoilma

WUFI®:n tietokannasta löytyy Suomen Ilmatieteen laitoksen tarjoamat tiedot neljän suomalaisen kaupungin sääolosuhteista. Koska tämän työn mallinnukset koskevat eteläsuomalaisia kohteita, on kaikkien mallinnusten ulkoilman olosuhteet mallinnettu Helsingin sää -tiedoston perusteella (Kuva 35). Valitun sijainnin sekä ilmansuunnan perusteella määräytyy myös rakenteeseen kohdistuva auringon säteily.



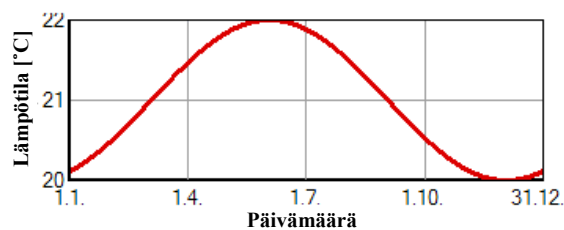
Kuva 35. Helsingin ilmasto-olosuhteet WUFI®:n tietokannassa. (14)

Sisäilma

Lisäämällä tyypillinen sisäilman kosteuslisän arvo 5 g/m^3 Helsingin sää -tiedostoon päädyttiin kokemukseräisellä arviolla liian suuriin sisäilman suhteellisen kosteuden arvoihin. Tästä syystä sisäilman olosuhteet arvioitiin suomalaisen kirjallisuuden perusteella (9) vaihtelevaan vuodenaikojen mukaan $20\text{--}22^\circ\text{C}$:n lämpötilan ja $30\text{--}60\%$:n suhteellisen kosteuden välillä. Mallinnuksissa käytetyt T- ja RH-kuvaajat on esitetty kuvassa 36.

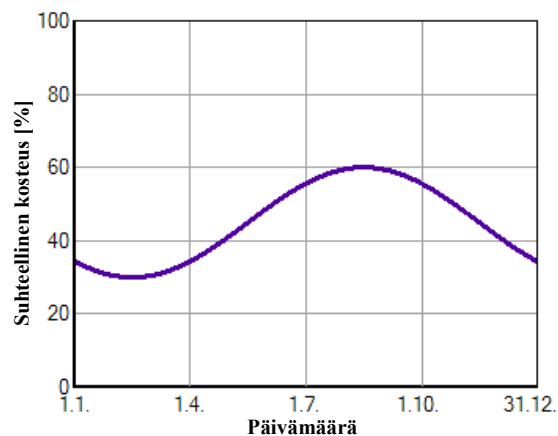
Lämpötila

Asetukset	
Keskiarvo [$^\circ\text{C}$]	21
Amplitudi [$^\circ\text{C}$]	1
Maksimiaron päivämäärä	3.6.2017



Suhteellinen kosteus

Asetukset	
Keskiarvo [%]	45
Amplitudi [%]	15
Maksimiaron päivämäärä	16.8.2017



Kuva 36. Kirjallisuuden perusteella arvioidut sisäilman olosuhteet.

Maaperä

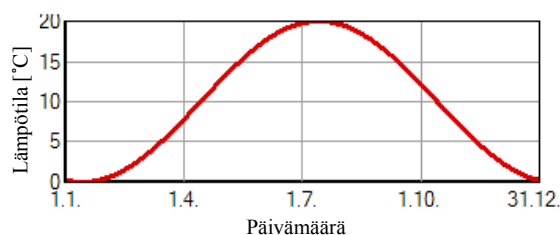
Lähellä maanpintaa maaperän lämpö- ja kosteusolosuhteet vaihtelevat viiveellä ulkoilman olosuhteiden mukaan. Syvemmälle mentäessä ulkoilman vaikutus maaperän olosuhteisiin pienenee. Laskelmissa ja mallinnuksissa oletetaan maaperän suhteelliseksi kosteudeksi 99 % tai 100 % riippuen siitä, oletetaanko maaperän olevan kostea vai täysin kyllästynyt pohjavedestä. WUFI® 2D -ohjelmassa 100 % suhteellinen kosteus tarkoittaa täysin vedellä kyllästettyä materiaalia tai pintaa. Lämpötila puolestaan arvioidaan syvyyden ja ulkoilman lämpötilan perusteella. Maan lämpötilan muutosnopeuteen vaikuttavat tarkasteltavan syvyyden lisäksi myös mahdolliset routaeristeet, tarkasteltava maalaji sekä pohjaveden syvyys.

Maanalainen lämpötila seuraa siis hitaasti ja pienellä viiveellä vuodenaikoja. Muutokset tapahtuvat hitaammin ja ovat pienempiä syvemmällä maaperässä ja keskemällä rakennusta. Erityisesti huonosti eristetyt alapohjat saattavat pitää alapuolisen maaperän lämpötilan lähellä sisäilman lämpötilaa. (9)

Mallinnuksia varten muodostettiin kaksi erilaista maaperän säätiedostoa, joista toinen kuvaa maanvastaisen seinän ja toinen maanvastaisen lattian olosuhteita. Molemmissa malleissa suhteellinen kosteus on määritetty 99 %:iin ja niiden lämpötilan vaihtelut on esitetty kuvissa 37 ja 38. Lämpötilakäyrät on arvioitu suomalaisen kirjallisuuden perusteella (9). Todellinen lämpötila vaihtelee eri tavalla eri kohdissa maanvastaisia rakenteita ja on siksi hyvin vaikea mallintaa tarkasti.

Lämpötila

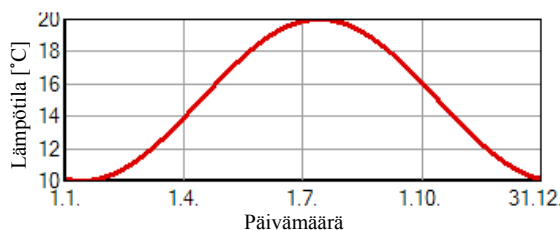
Asetukset	
Keskiarvo [°C]	10
Amplitudi [°C]	10
Maksimiaron päivämäärä	15.7.2017



Kuva 37. Maanvastaisen seinän viereinen lämpötila vaihtelee 0-20 °C:n välillä.

Lämpötila

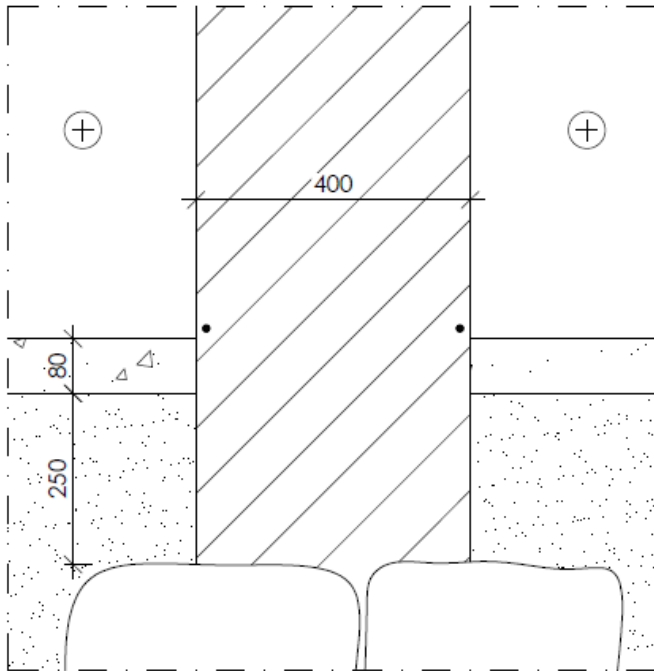
Asetukset	
Keskiarvo [°C]	15
Amplitudi [°C]	5
Maksimiaron päivämäärä	15.7.2017



Kuva 38. Rakennuksen alapuolinen lämpötila vaihtelee 10-20 °C:n välillä.

5.2 Tiilirakenteinen maanvarainen väliseinä

Ensimmäinen ja yksinkertainen mallinnus tehtiin teoreettisesta tilanteesta, jossa pohjavesi nousee kapillaarisesti maanvaraista 40 cm:n paksuista tiilimuurattua väliseinää pitkin rakenteisiin. Tarkoituksena oli tutkia temperierung-lämmitysputkien toimivuutta kapillaarikatkona. Tilanne on esitetty tarkemmin kuvassa 39.

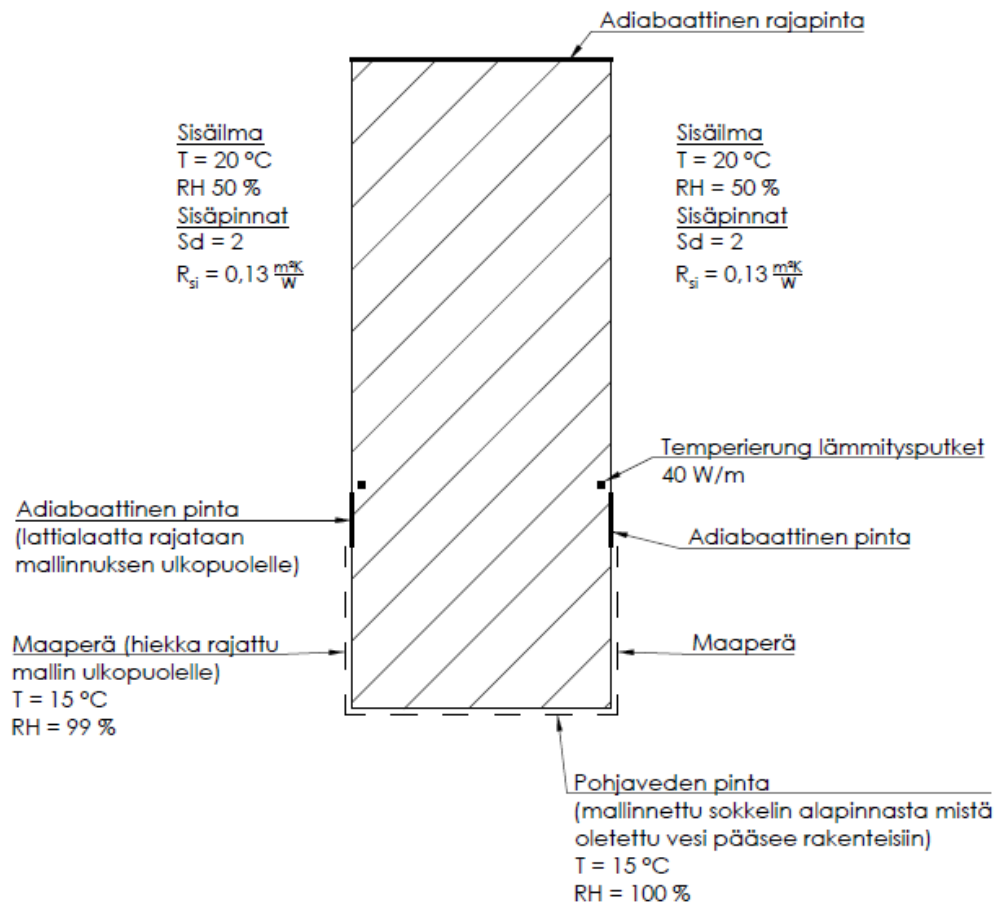


Kuva 39. Tiilirakenteisen maanvastaisen väliseinän rakenneleikkaus.

Lähtötietoina käytettiin edellisessä kappaleessa mainituista arvoista poiketen kuvassa 40 esitettyjä vuodenaajoista riippumattomia ja näin ollen muuttumattomia arvoja. Tämä mallinnus vastaa siis enemmän laboratorio-olosuhteita, kuin todellista tilannetta. Pohjavesi mallinnettiin asettamalla rajapinnaksi 100 %:n suhteellinen kosteus, joka vastaa WUFI® 2D -ohjelmassa täysin vedellä kyllästettyä pintaa. Lattiarakenteet mallinnettiin adiabaattisiksi rajapinnoiksi, joiden läpi ei kulkeudu lämpöä eikä kosteutta. Materiaalina yksinkertaistetussa mallissa (Kuva 40) käytettiin ainoastaan vanhaa tiiltä, jonka olennaisimmat ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

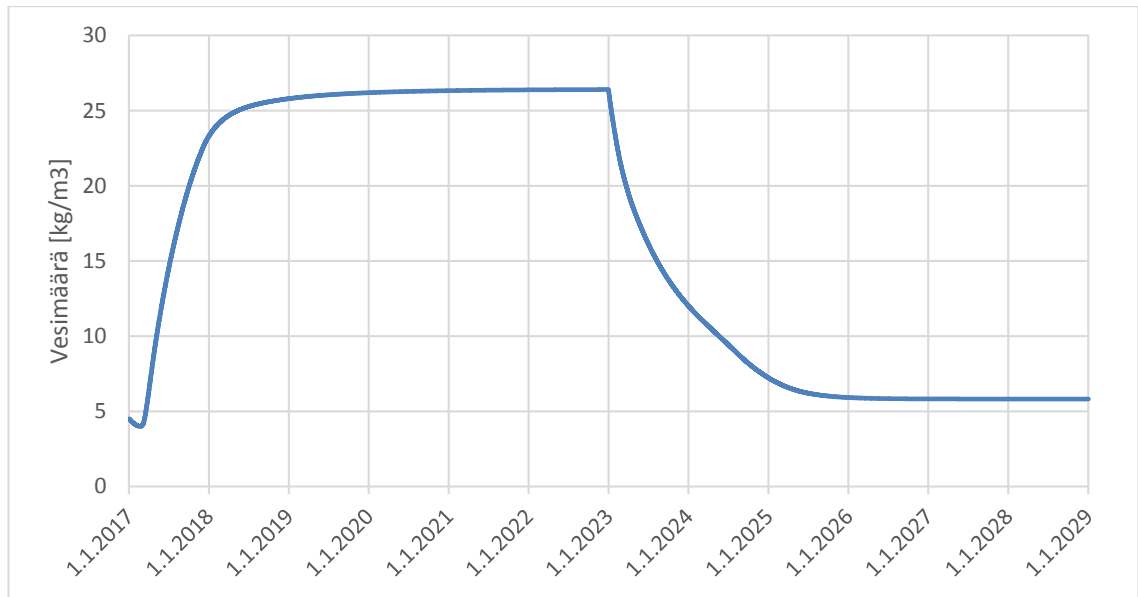
Taulukko 1. Tiilirakenteisen maanvastaisen väliseinän materiaaliominaisuudet. (14)

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus λ [W/(mK)]	Ominaislämpö- kapasiteetti c_p [J/(kg*K)]	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin μ -
Tiili	1800	0,6	850	15



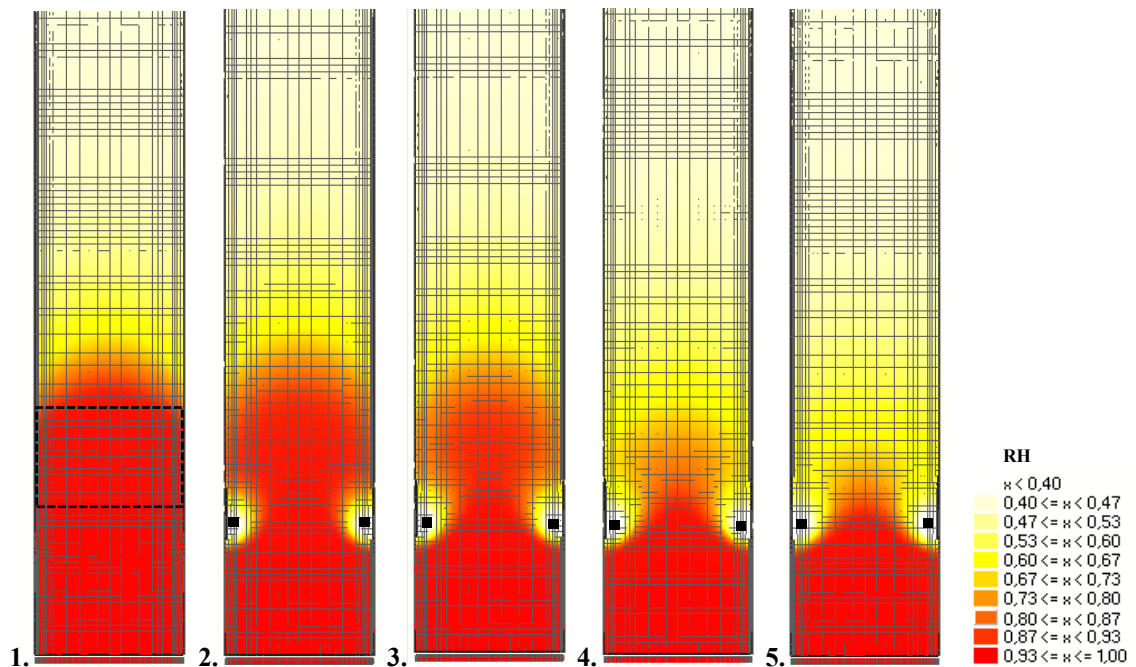
Kuva 40. Tiilirakenteisen maanvastaisen seinän yksinkertaistettu WUFI® 2D -malli. Seinä mallinnettiin lattiapinnasta kahden metrin korkeudelle, jotta yläosan adiabaattisen rajapinnan vaikutus tuloksiin olisi mahdollisimman vähäinen. Tämä havainnollistava kuva on siis piirretty matalammaksi kuin toteutettu mallinnus.

40 cm leveän ja noin 2 metriä korkean tiiliseinän mallinnus suoritettiin 12 vuoden ajanjaksolta alkaen 1.1.2017. Ensimmäiset kuusi vuotta mallinnettiin kosteuden kapillaarista nousua ilman rakenteiden sisäistä lämmitystä. Tämän jälkeen seinärakenteeseen oletetun lattiapinnan yläpuolelle mallinnettiin kaksi 40 W/m tehoista lämmönlähdettä, jotka vastaavat tässä tapauksessa noin 60 °C:n lämpötilassa olevia seinän sisäisiä 15 mm:n paksuisia lämmitysputkia. Mallinnuksen ajanjaksolla tapahtuvat rakenteen vesimäärän muutokset on esitetty kuvassa 41. Kuvasta näkee selvästi kapillaarisen veden nousun alkuvaiheessa ja 1.1.2023 kytketyn lämmönlähteen kuivattavan vaikutuksen loppuvaiheessa. Lämmitysputkien aiheuttamat muutokset seinän lämpötilajakaumaan tapahtuivat suurilta osin alle puolessa vuodessa. Tiilirakenteisen maanvaraisen väliseinän lämpötilajakaumat eri ajanhetkillä on esitetty liitteessä 1.



Kuva 41. Tiiliseinän kuivattavan alueen keskimääräinen vesimäärä mallinnuksen aikajaksolla. Alussa näkyy veden kapillaarisen imeytymisen aiheuttama vesimäärän lisääntyminen ja 1.1.2023 eteenpäin lämmitysputkien aikaansaama rakenteen kuivuminen. Kyseessä oleva kuivattava alue on merkitty katkoviivalla kuvaan 42.

Kuvassa 42 on esitetty seinän poikkileikkauksen kosteusjakaumia ennen ja jälkeen temperierung-järjestelmän asentamisen. Ensimmäinen kuva on ajanhetkeltä 31.12.2022 eli päivää ennen lämmityksen kytkemistä päälle. Tässä vaiheessa kapillaarisen kosteuden nousu on jo lähes pysähtynyt. Viimeinen kuva puolestaan on mallinnuksen lopetushetkeltä 31.12.2028, jolloin lämmitysputkien kuivattava vaikutus on tasaantunut.

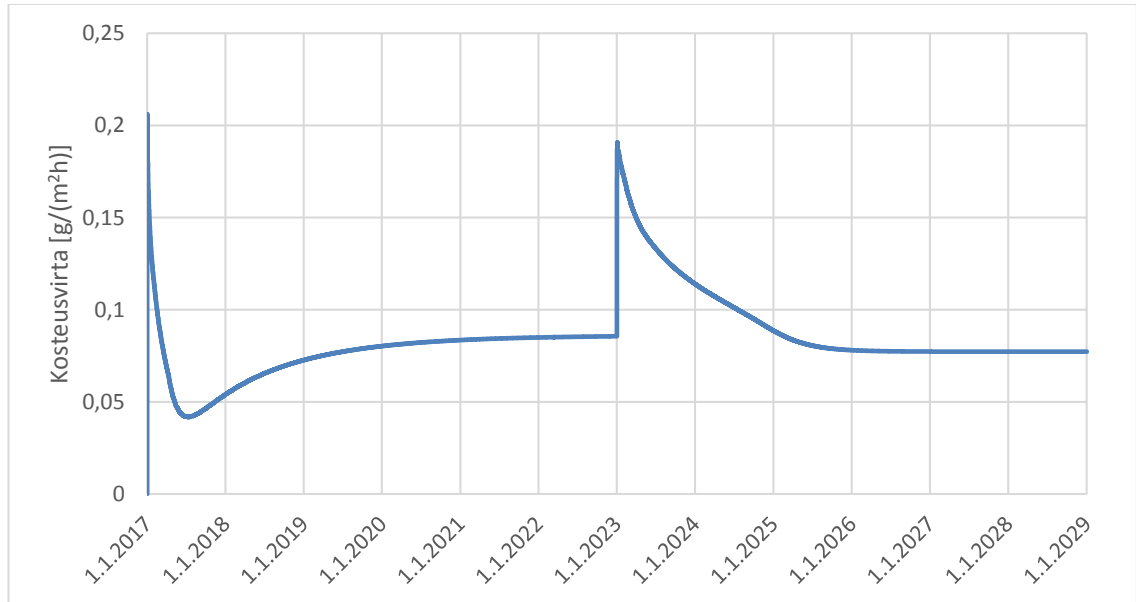


Kuva 42. Tiiliseinän kosteusjakaumat vasemmalta alkaen:

1. Lähes tasaapainotila juuri ennen lämmitysputkien asentamista 31.12.2022
2. Kuusi kuukautta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
3. Vuosi lämmitysputkien asentamisen jälkeen
4. Kaksi vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
5. Kuusi vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen

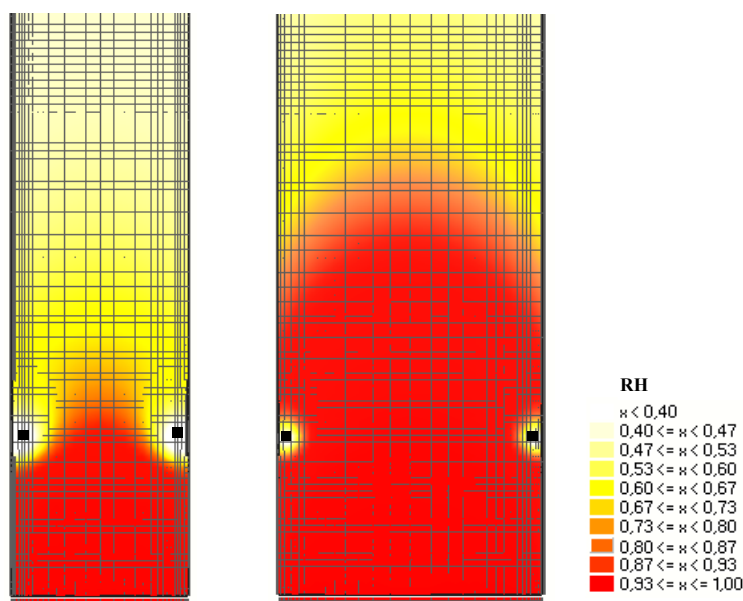
Vasemmanpuolimmaisesta kuvaan on merkitty katkoviivalla kuvan 41 vesimäärän mitta-alue.

Kuvasta 43 voi nähdä lämmitysputkien vaikutuksen tiiliseinästä sisäilmaan suuntautuvan kosteusvirran suuruudessa. Kuten kuvaajasta voi todeta, voimistuu sisäilmaan suuntautuva kosteusvirta huomattavasti, kun lämmitys kytketään päälle 1.1.2023. Kosteusvirta pysyy erityisen voimakkaana varsinkin ensimmäiset kuukaudet ja palautuu noin kahden ja puolen vuoden kuluessa lähtötasolle.



Kuva 43. Kosteusvirta seinän oikeanpuoleisesta pinnasta sisäilmaan. Ensimmäinen piikki kuvaa mallinnuksen lähtöarvojen tasoittumista ja toinen päälle kytkettyjen lämmönlähteiden vaikutusta.

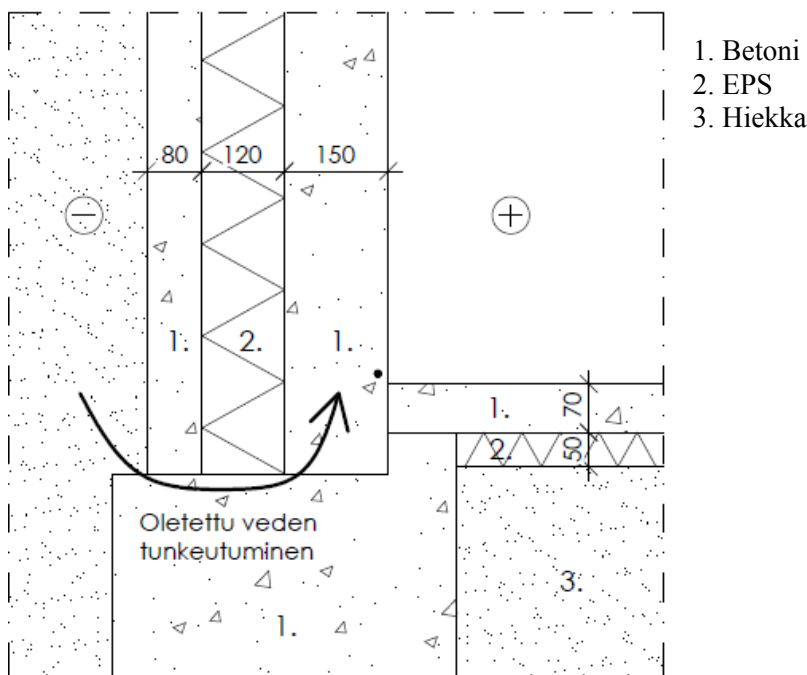
Ensimmäinen versio tästä mallista tehtiin 60:n senttimetrin paksuisena, jolloin kaksi 40 W/m lämmitysputkea eivät riittäneet estämään kosteuden nousua rakenteisiin. Sama mallinnus uusittiin 20 cm kapeammalla seinärakenteella, joka johti tässä esiteltäviin lopputuloksiin. Kuvassa 44 on esitetty seinän paksuuden aiheuttama ero temperierungsmenetelmän toimintaan kapillaarikatkona. Seinän paksuudella on siis huomattava vaikutus rakenteiden sisäisten lämmitysputkien toimintaan.



Kuva 44. Kaksi eri paksuista seinää varustettuna 40 W/m tehoisilla temperierungslämmitysputkilla. Vasemmalla 40 cm ja oikealla 60 cm paksu seinä.

5.3 Maanvastainen betonisandwich-ulkoseinä

Kohteena oli Itä-Helsingissä sijaitsevan rivitalon pääty, jossa oli havaittu vesivuodon kartoituksen yhteydessä pidempiaikaisia kosteusongelmia maanvastaisessa seinässä. Seinän alaosasta 45 mm:n syvyydeltä sisäpuolisesta betonista oli mitattu suhteelliseksi kosteuspitoisuudeksi 95 %. Maanpinta talon ympärillä viettää seinää kohti, joten oletuksena oli, että sade- ja vajovedet pääsevät tunkeutumaan rakenteisiin. Seinän rakenneleikkaus ja veden oletettu tunkeutumisreitti on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Maanvastaisen betonisandwich-seinän rakenneleikkaus. Materiaalien tiedot on esitetty taulukossa 2.

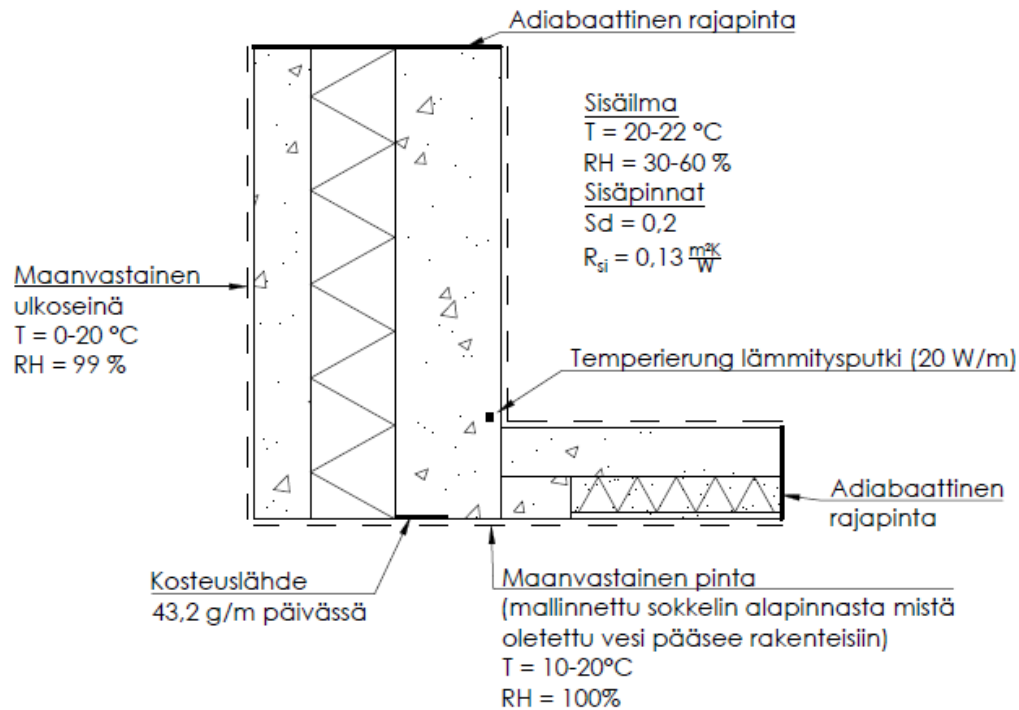
Yllä olevaan rakenneleikkaukseen on merkitty myös rakenteiden oletetut materiaalit, joiden laskelmissa käytettyjä lämpö- ja kosteusteknisiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Betonisandwich-seinän mallinnuksessa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia. (14)

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus λ [W/(m*K)]	Ominaislämpökapasiteetti c_p [J/(kg*K)]	Vesihöyryn diffuusi- vastuskerroin μ -
Betoni C35/45	2220	1,6	850	248
EPS	30	0,04	1500	50
Hiekka	1579	0,505	850	50

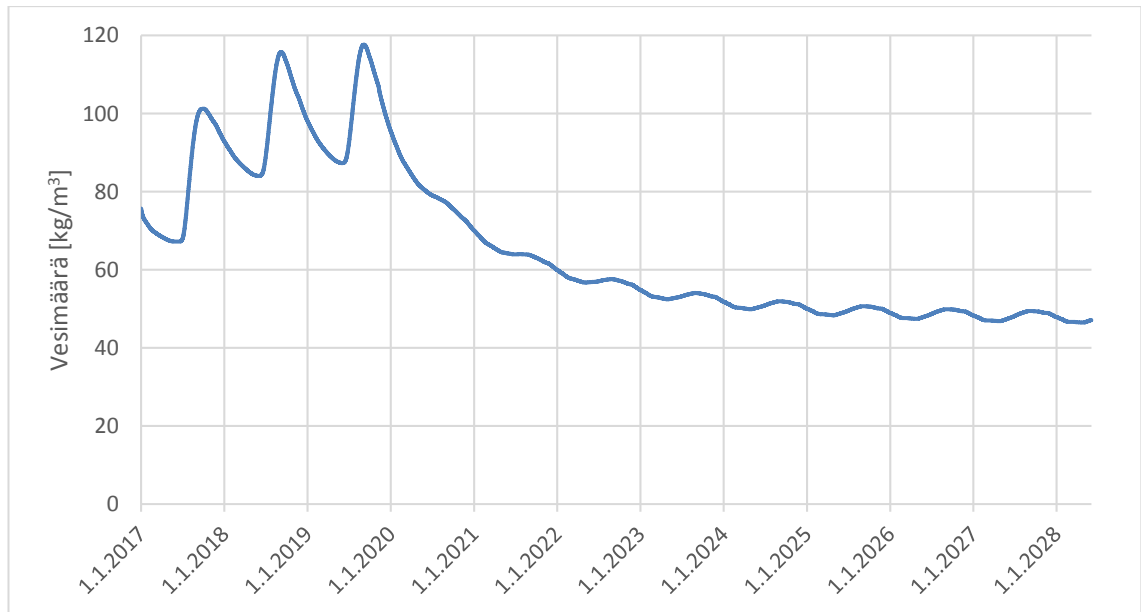
Mallinnuksen yksinkertaistamista varten rakenne leikattiin seinän ja anturan liitoskohdasta, mistä veden oletettiin nousevan kapillaarisesti eristeen sisäpuoliseen betoniin. Tähän rajapintaan asetettiin rakennuksen alapuolisen maaperän olosuhteet ja lisäksi kosteuslähde, joka syöttää rakenteeseen 43,2 g/m vettä päivässä. Tähän lukuun päästiin kokeilemalla mallintamista eri kosteuslähteen arvoilla ja vertaamalla malleja kohteessa suoritettujen kosteusmittausten tuloksiin. Todellisen tilanteen kosteuslähteestä ja kosteuden määrästä ei siis ole varmuutta. Kosteudensyöttö ei kuitenkaan oletettavasti ole oikeassa tilanteessa tasainen kuten mallissa, vaan ennemminkin ajoittain voimistuva ja

heikentyvä. Laskelmissa käytetty malli, sen rajapinnat sekä kosteus- ja lämmönlähteet on esitetty kuvassa 46.



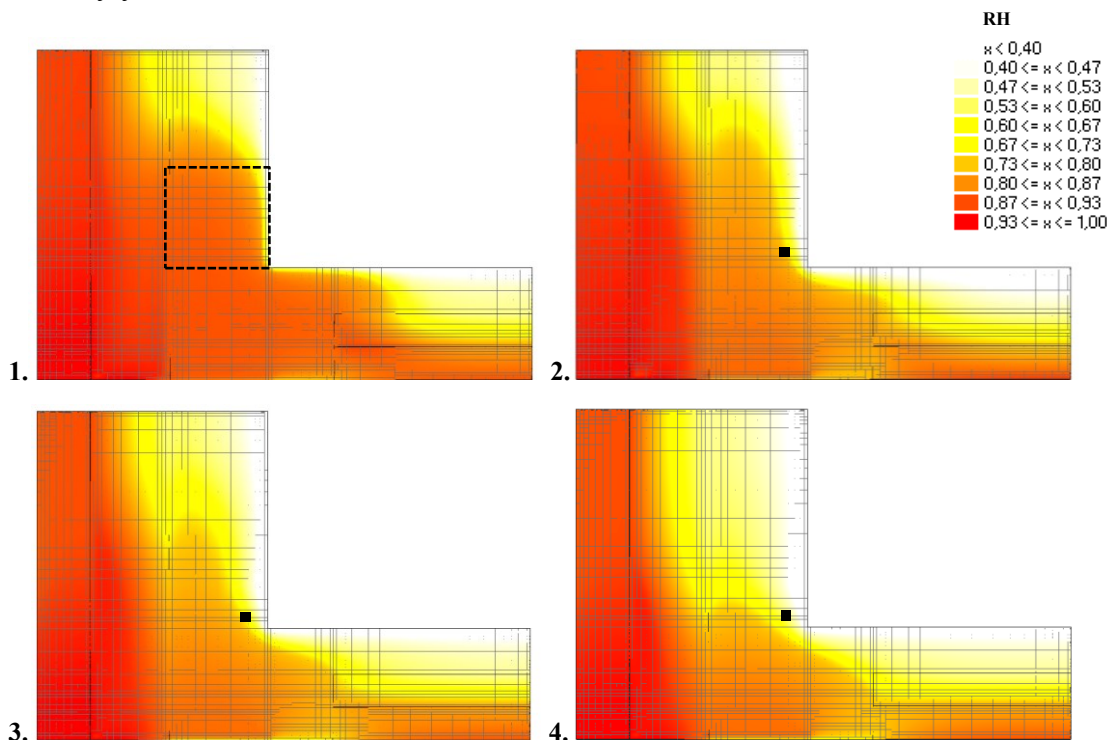
Kuva 46. Maanvastaisen betonisandwich-seinän yksinkertaistettu WUFI® 2D -malli.

Mallinnus toteutettiin siten, että olosuhteiden hitaan tasoittumisen johdosta seinän sisäinen lämmönlähde kytkettiin päälle vasta 25 000 tunnin eli vajaan kolmen vuoden ajanjakson jälkeen. Tämän jälkeen mallinnusta jatkettiin vielä 75 000 tunnin eli noin 8,5 vuoden ajan. Vertailun vuoksi mallinnuksia tehtiin sekä 10 W/m että 20 W/m tehoisilla lämmönlähteillä, joista jälkimmäisen tuloksia tarkastellaan tarkemmin nopeamman kuivumisen johdosta. Molemmat kuitenkin riittivät kuivattamaan kapillaarisen kosteusvirran ennen sen pääsyä rakenteen pinnalle. Kuvassa 47 on esitetty seinän kuivatettavasta osasta määritetyn mittausalueen sisältämä vesimäärä kuutiometriä kohden mallinnuksen ajanjaksolla. Mallinnus alkaa vuoden 2017 alusta, jolloin temperierung-menetelmän vaikutus vesimäärään näkyy vuoden 2019 loppupuolelta eteenpäin. Mallinnuksen loppuvaiheessa kosteusmäärä tasoittuu lähes tasapainotilaan siten, että ainoastaan vuodenaikojen vaihtelut näkyvät käyrässä.



Kuva 47. 20 W/m tehoisella lämmönlähteellä varustetun betonisandwich-seinän mittausalueen keskimääräinen vesimäärä mallinnuksen aikajaksolla. Alue on merkitty katkoviivalla kuvaan 48.

Mallinnuksesta tehtiin myös seinän suhteellista kosteutta kuvaava animaatio, josta eri ajankohdilta irroitettuja tilanteita on esitetty kuvassa 48. Huomionarvoista kosteusjakaumissa on, että seinärakenteen lisäksi seinän sisäinen lämmönlähde kuivattaa tehokkaasti myös lattiarakenteita. Vastaavanlaiset kuvat rakenteen lämpötiloista ja vesimäärästä löytyvät liitteestä 2.

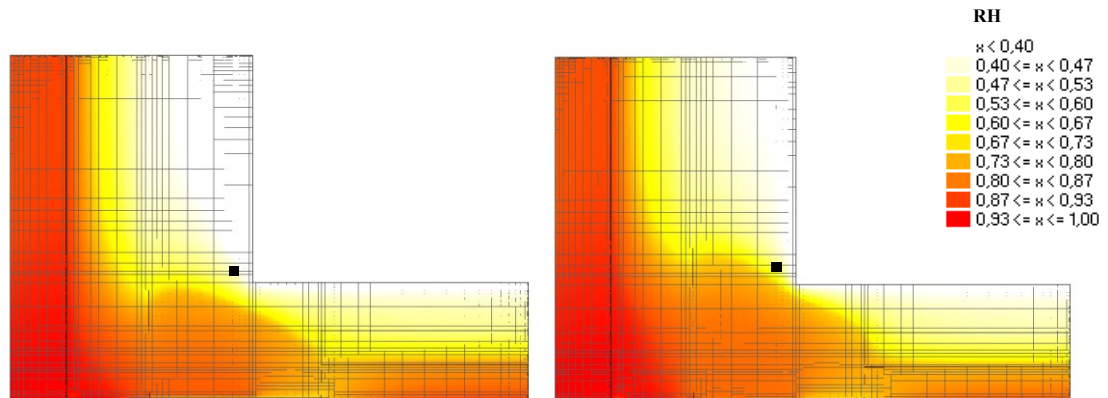


Kuva 48. 20 W/m lämmityskaapelilla varustetun betonisandwich-seinän kosteusjakaumat vasemmalta ylhäältä alkaen:

1. Lähes tasaapainotila juuri ennen lämmityskaapeleiden asentamista 8.11.2019
2. Kuusi kuukautta lämmityskaapeleiden asentamisen jälkeen
3. Vuosi lämmityskaapeleiden asentamisen jälkeen
4. Kaksi vuotta lämmityskaapeleiden asentamisen jälkeen

Ensimmäiseen kuvaan on merkitty katkoviivalla kuvassa 47 esitetyn vesimäärän mittausalue.

Mallinnusten perusteella sähköinen minimiteholtaan 10 W/m lämmityskaapeli (vastaa tässä rakenteessa noin 26 °C:n lämpötilassa olevaa vesikiertoista putkea) riittäisi pikkuhiljaa kuivattamaan seinän sisäosan ja pitämään sen kuivana. Kuivatuksen toteuttaminen on kuitenkin tarkoituksenmukaisempaa 20 W/m tehoisella (noin 31 asteinen vesikiertoinen lämmitysputki) lämmönlähteellä, jolloin tulokset näkyvät selvästi jo kuuden kuukauden sisällä lämmityksen päälle kytkemisestä. Kuivatus voidaan myös toteuttaa siten, että alkuvaiheessa lämmitystehoa pidetään suurempana ja lasketaan pienemmäksi rakenteen kuivuttua. Kuvassa 49 on havainnollistettu eri tehoisten lämmönlähteiden vaikutusta 8:n vuoden päästä asennuksesta, kun kosteusjakaumat ovat asettuneet lähes tasapainotiloihin.



Kuva 49. Lähes tasapainotilat 8 vuoden mallintamisen jälkeen. Vasemmalla 20W/m ja oikealla 10 W/m lämmityskaapelilla.

Mallinnuksen tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että vuotoveden määrä ja alkupe-
rä on määritelty kuntotutkimuksessa tehtyjen mittausten perusteella ja niiden tarkemmat
arvot ovat mallinnusohjelman perusteella saatuja arvioita. Varmaa tietoa veden alkupe-
rystä ei ole mahdollista saada ilman perusteellisempia tutkimuksia ja mahdollisia raken-
neavauksia. Mitä enemmän kapillaarista vettä rakenteeseen nousee, sitä suuremmat
energiamäärät sen kuivattamiseen tarvitaan.

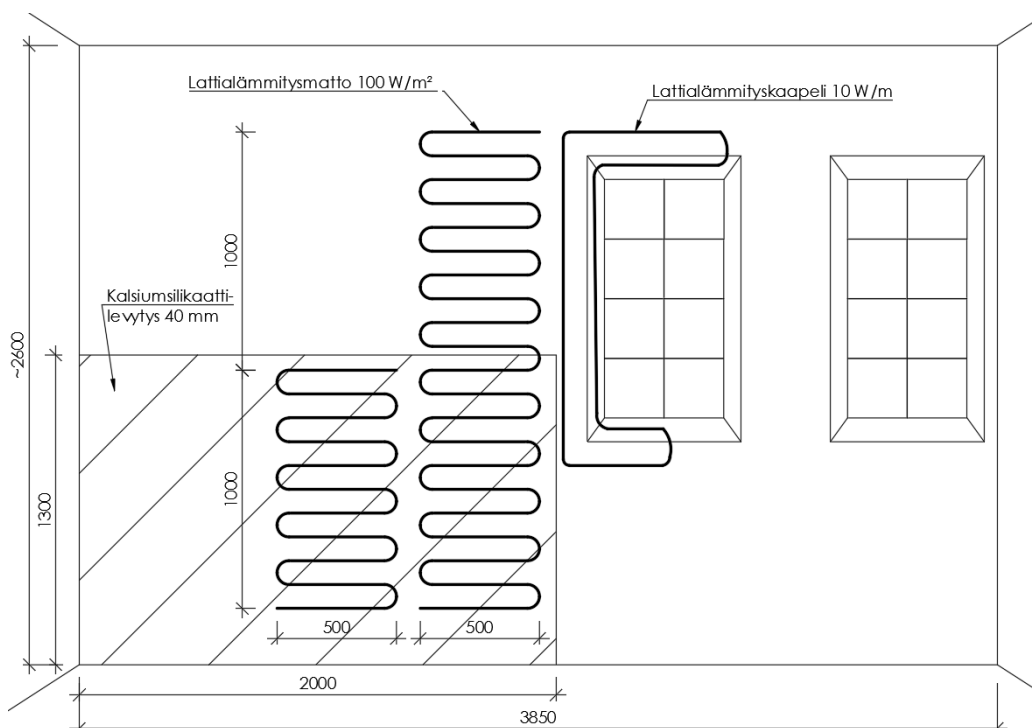
6 Koekohde

6.1 Lähtötiedot

Tämän työn korjausmenetelmän koekohteeksi valikoitui 1900-luvun alun tyypillinen luonnonkiviverhoiltu massiivitiiliseinä. Länsi-Suomessa sijaitsevassa rakennuksessa ongelmaksi oli muodostunut sadeveden pääsy seinän kiviverhouksen taakse ja mahdollisesti myös kapillaarinen kosteuden nousu maaperästä. Tilannetta oli pahentanut jälkikäteen lisätyt sisäpuoliset lämmöneristeet sekä alumiinipintainen bitumoitu pahvi, joiden johdosta kosteuden kuivuminen sisätiloihin oli käytännössä estetty. Kosteuden kerääntymisen johdosta lämmöneristeistä oli löytynyt mikrobikasvustoja, minkä johdosta ne oli poistettu kokonaan.

Rakennuksen julkisivu koostuu itsensä kantavista graniittikivistä, jotka on oletettavasti muurattu 1900-luvun alussa yleisesti käytetyllä kalkkilaastilla. Julkisivuverhous liittyy takana olevaan tiilimuuriin niin ikään laastitäytöllä ja sidekivillä. Tiiliseinän sisäpuoli on rapattu ja maalattu. Tuuletusrakoa ei seinässä tiettävästi ole ollenkaan. Sadeveden pääsy kiviverhouksen taakse on tyypillinen ongelma vastaavanlaisissa saman aikakauden luonnonkiviverhoilluissa massiivitiiliseinissä (9).

Kuivattavana korjauksena rakennuksen yhdessä huoneessa päätettiin kokeilla seinän lämmittämistä lattialämmityskaapeleilla. Koska korjaus tehtiin koemielessä, asennettiin saman huoneen seinille vertailun vuoksi myös kalsiumsilikaattilevyjä. Asennukset tehtiin siten, että osa seinäpinnasta jätettiin ennalleen, osaan asennettiin lämmityskaapelit ja osa peitettiin kalsiumsilikaattilevyillä. Näin temperierung-menetelmää voitiin vertailla korjaamattoman seinäpinnan lisäksi myös Suomessa jo yleisemmässä käytössä olevaan kosteusongelmien korjausmenetelmään. Lisäksi lämmityskaapelit ja kalsiumsilikaattilevyt asennettiin osittain myös limittäin, jotta niiden yhteistoimintaa voitiin tarkastella. Asennusten sijainnit pohjoisenpuoleisella seinällä on esitetty kuvassa 50. Etelänpuoleisen seinän asennukset näkyvät liitteessä 3.

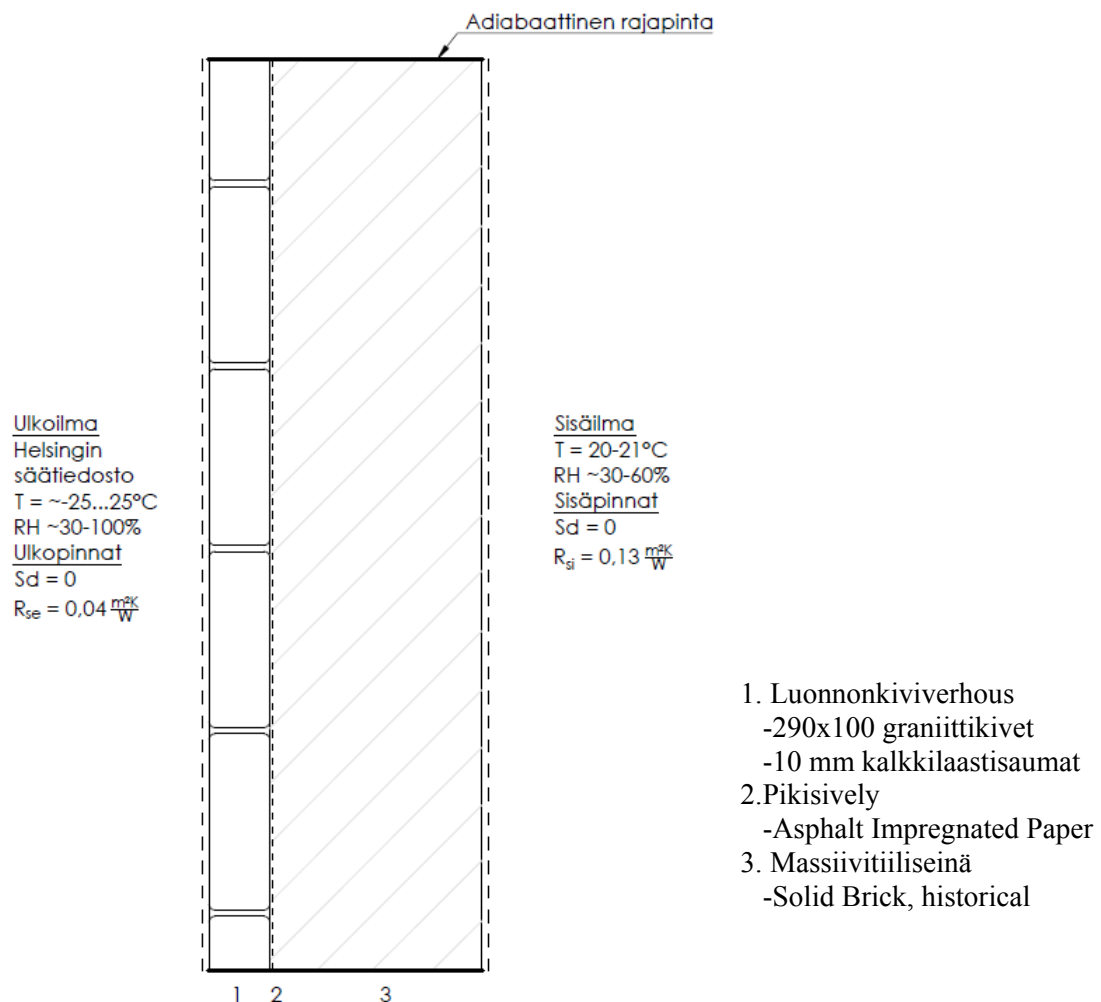


Kuva 50. Koekohteen pohjoisen puoleisenseinän asennukset.

Kalsiumsilikaattilevyihin verrattuna temperierung-lämmitysmenetelmän vaikutus rakenteen lämpötekniiseen toimintaan on päinvastainen. Lämmityskaapeleiden tarkoituksena on lämmittää seinärakennetta ja siten kuivattaa se. Kalsiumsilikaattilevyt puolestaan eristävät seinärakenteen lämpimästä sisäilmasta, jolloin seinän sisäinen lämpötila erityisesti kylminä kuukausina laskee.

6.2 Mallinnus

Koekohteen rakennusfysikaalisessa mallinnuksessa käytettiin kappaleessa 5.1 esiteltyjä ilmastollisia lähtötietoja sekä kuvan 51 mukaista hieman yksinkertaistettua mallia olemassa olevasta rakenteesta. Myös lähtötietoja yksinkertaistettiin siten, että mallinnuksen aloitushetkellä seinärakenne määriteltiin täysin märäksi. Todellisuudessa seinän kosteuspitoisuus vaihtelee eri syvyyksillä ja sisäpinta on rakenteen sisäosia kuivempi.



Kuva 51. Luonnonkiviverhotun massiivitiiliseinän WUFI® -malli.

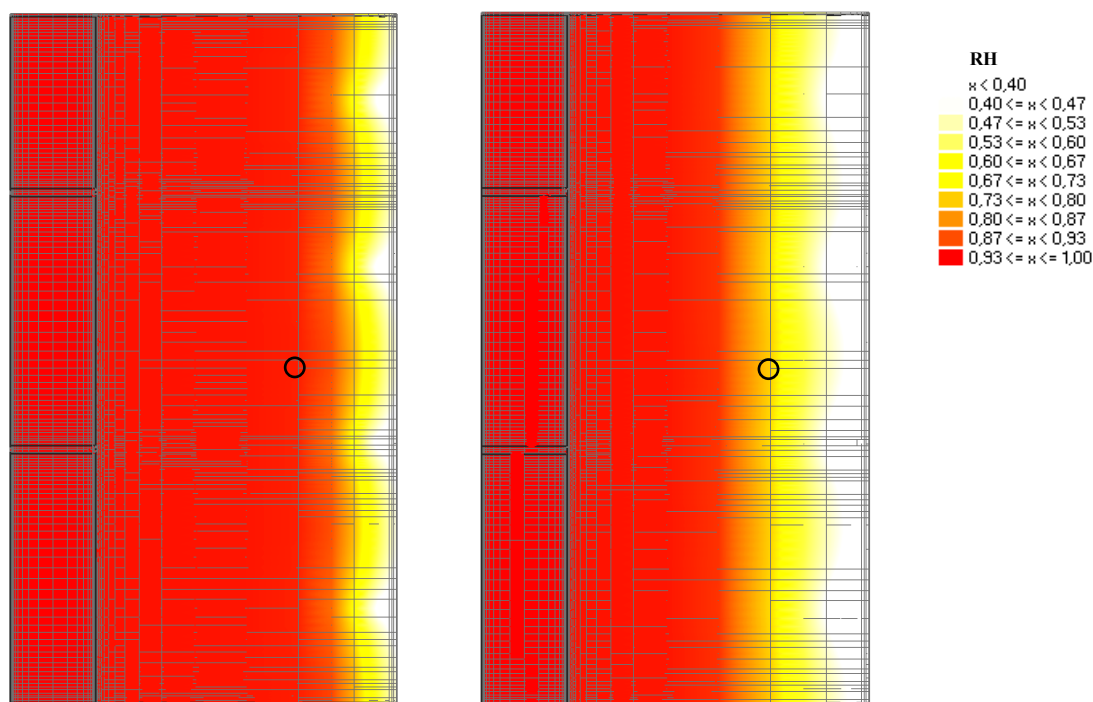
Kuvaan 51 merkittyjen materiaalien mallinnuksessa käytetyt laskenta-arvot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Koekohteen mallinnuksessa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia. (14)

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus λ [W/(mK)]	Ominaislämpö- kapasiteetti c_p [J/(kg*K)]	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin μ -
Graniitti	2453	1,66	702	10 000 ¹⁾
Kalkkilaasti	1600	0,7	850	7
Tiili	1800	0,6	850	15
Bitumisively	909	10	1500	2144,8

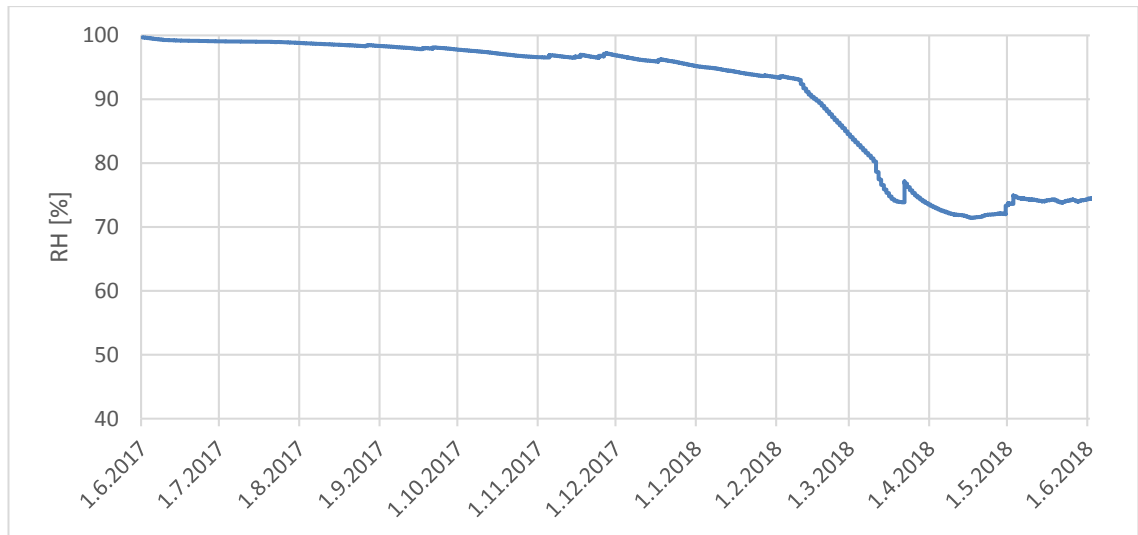
1) Korjattu Suomen Standardisoimisliiton ilmoittamaksi arvoksi (47)

Koekohdetta varten tehtyjen ensimmäisten mallinnusten perusteella temperierungmenetelmää laajennettiin koko seinän kattavaksi seinälämmitykseksi, sillä rakenteita kastelevan veden on arvioitu tulevan ainakin osittain luonnonkivisen julkisivun saumojen läpi. Tarkoituksena on parantaa rakenteen kuivumiskykyä nostamalla rakenteen pintaosien lämpötilaa, jolloin rakenteen kuivuminen huoneilmaan päin tehostuu. Kuvassa 52 on esitetty 20 cm:n välein asennettujen 10 W/m tehoisten lämmityskaapeleiden mallinnettu vaikutus läpimäärän seinän kosteusjakaumaan.



Kuva 52. Luonnonkiviverhoillun massiivitiiliseinän mallinnetut kosteusjakaumat. Vasemmalla 3 kuukautta ja oikealla vuosi lämmityspotkien asennuksen jälkeen. Kuviin on ympyrällä merkitty 100 mm:n syvyydessä olevan mittauspisteen sijainti.

Kuvasta 53 voidaan tarkastella edelliseen kuvaan merkityn mittauspisteen kosteusjakamaa vuoden ajalta. Kuten kuvista voi nähdä, saavuttaa lämmityskaapeleiden kuivatava vaikutus 100 mm:n syvyyden mallinnusten perusteella vasta noin 8-9 kuukauden päästä.



Kuva 53. Kuvassa 52 näkyvän 100 mm:n syvyydessä olevan mittauspisteen mallinnettu suhteellinen kosteus.

6.3 Asennus ja mittaus

Lämmityskaapeleiden asennus suoritettiin sähköurakoitsijan toimesta toukokuun 2017 aikana. Päivää ennen lämmityskaapeleiden päälle kytkemistä 1.6.2017 huoneeseen asennettiin 15 kappaletta seinän sisäistä lämpötilaa ja kosteutta mittaavaa Tinytag-loggeria. Antureita porattiin seinän sisälle kahdelle eri syvyydelle (100mm ja 250mm) rapatusta tiilimuurin pinnasta. Valmiista seinän pinnasta mitattuna anturit tulivat neljälle eri syvyydelle, sillä osa rappauspinnasta päällystettiin 40 millimetrin paksuisilla kalsiumsilikaattilevyillä. Lämmityskaapeleiden ja loggereiden sijainnit seinillä on esitetty liitteessä 3. Yksi mittauspiste jouduttiin siirtämään pohjoisseinältä eteläseinälle, sillä kalsiumsilikaattilevyjen eristävän vaikutuksen johdosta sen takana olevaa lämmitysmattoa ei onnistuttu havaitsemaan lämpökameralla. Kaksi Tinytag-loggeria jätettiin myös mittaamaan sisäilman ja ulkoilman olosuhteita huoneen sisältä sekä rakennuksen vierestä. Seinälämmityskaapelit kytkettiin päälle 2.6.2017.



Kuvat 54 ja 55. Lämmityskaapeleiden asennus. Vasemmalla eteläpuoleinen ja oikealla pohjoispuoleinen seinä.

Tätä diplomityötä varten suoritettiin aikataulun rajoissa kolme kuukautta kestävät mittaukset. Kosteutta ja lämpötilaa mittaavat loggerit (Kuvat 56 ja 57) jätettiin kuitenkin tämän jälkeen paikoilleen jatkoseurantaa varten.

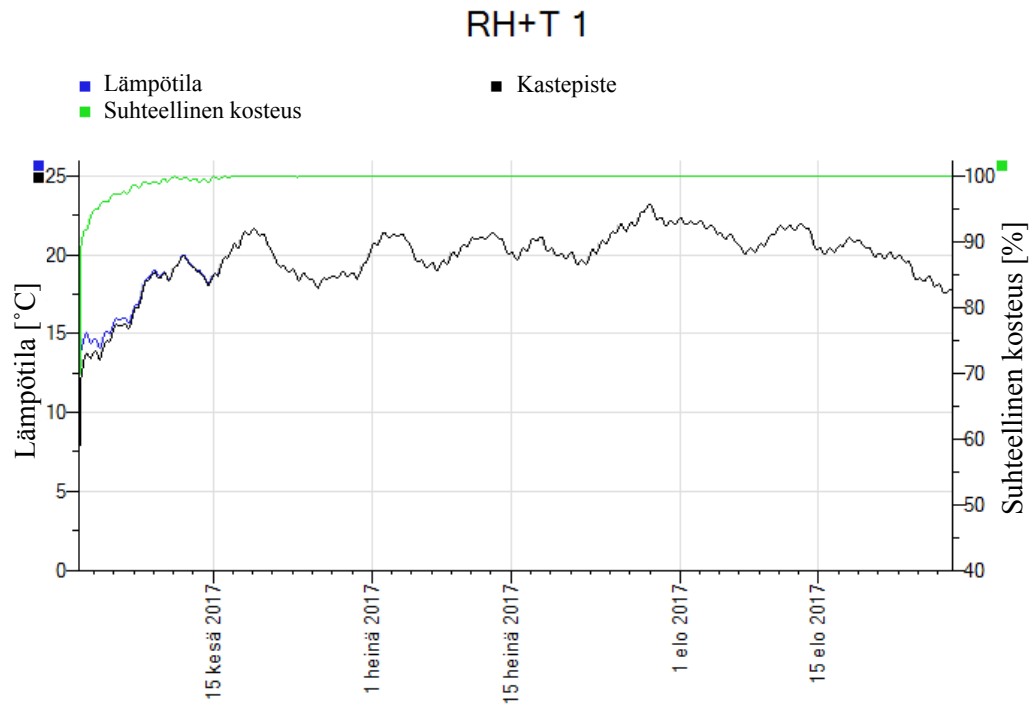


Kuvat 56 ja 57. Lämmityskaapeleiden päälle rapattu ja maalattu seinäpinta sekä Tinytag-loggereita.

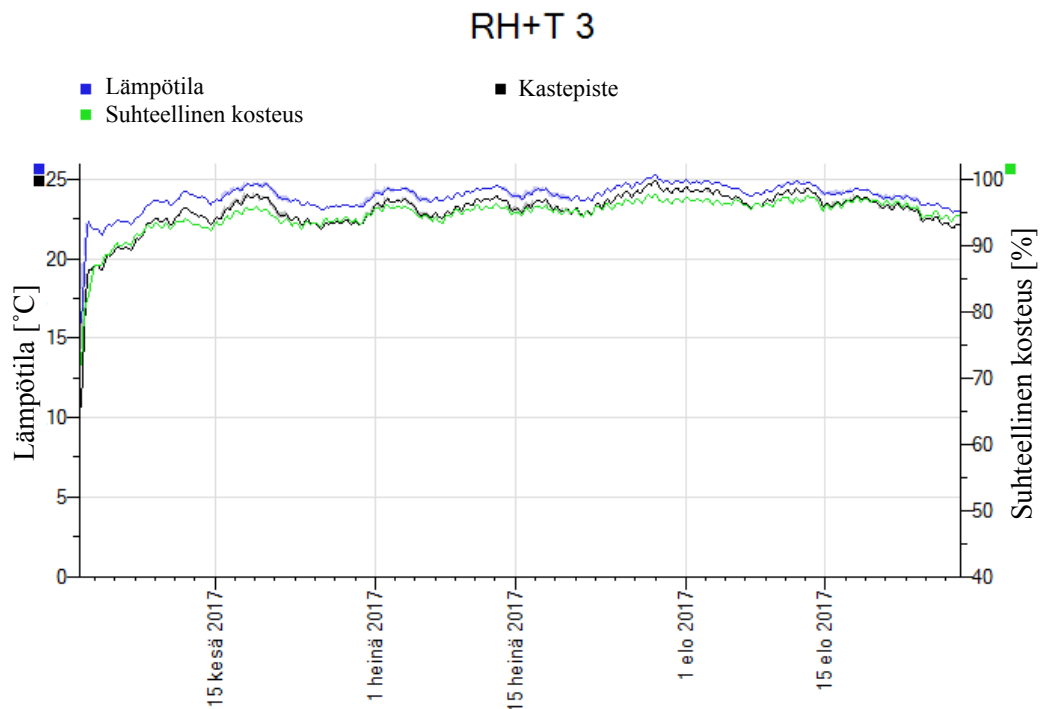
6.4 Tutkimustulokset

Kuten koekohdetta varten tehtyjen mallinnusten perusteella voitiin olettaa, kuivui massiivisesta seinärakenteesta kolmen kuukauden aikana vain pintarakenteet. Koska tuloksia voitiin ennakoida jo mallinnusten perusteella, päätettiin mittauslaitteet alun perin jättää paikoilleen vähintään vuoden ajaksi. Diplomityön rajallisen aikataulun johdosta lopulliset tulokset eivät ehdi tähän työhön mukaan, joten niistä raportoidaan myöhemmin. Tähän asti mitatut lämpötila- ja kosteusjakaumien pienet muutokset ovat kuitenkin suhteellisen lähellä mallinnettuja tuloksia, joten näillä näkymin oletettavaa on, että rakenteiden kuivuminen jatkuu mallinnusten osoittamalla tavalla.

Kuvassa 58 on esitetty lämmittämättömän ja kuvassa 59 lämmitetyn seinän 100 mm:n syvyydeltä mitatut kosteus- ja lämpötilajakaumat. Kuvaajista voi nähdä tähänastisen hyvin pienen eron suhteellisessa kosteudessa. Näiden tulosten perusteella on kuitenkin vielä mahdotonta tehdä suurempia johtopäätöksiä menetelmän toiminnasta. On myös huomion arvoista, että mittaustuloksiin voivat vaikuttaa myös muun muassa uuden rappausmateriaalin rakennekosteus tai mahdolliset häiriöt mittauslaitteissa. Erityisesti mitauspisteitä, joissa suhteellinen kosteus on asettunut pysyvästi arvoon 100 % (esim. kuva 58), on syytä pitää silmällä. Jatkuva korkea kosteuspitoisuus saattaa joissakin tilanteissa vaurioittaa antureita.

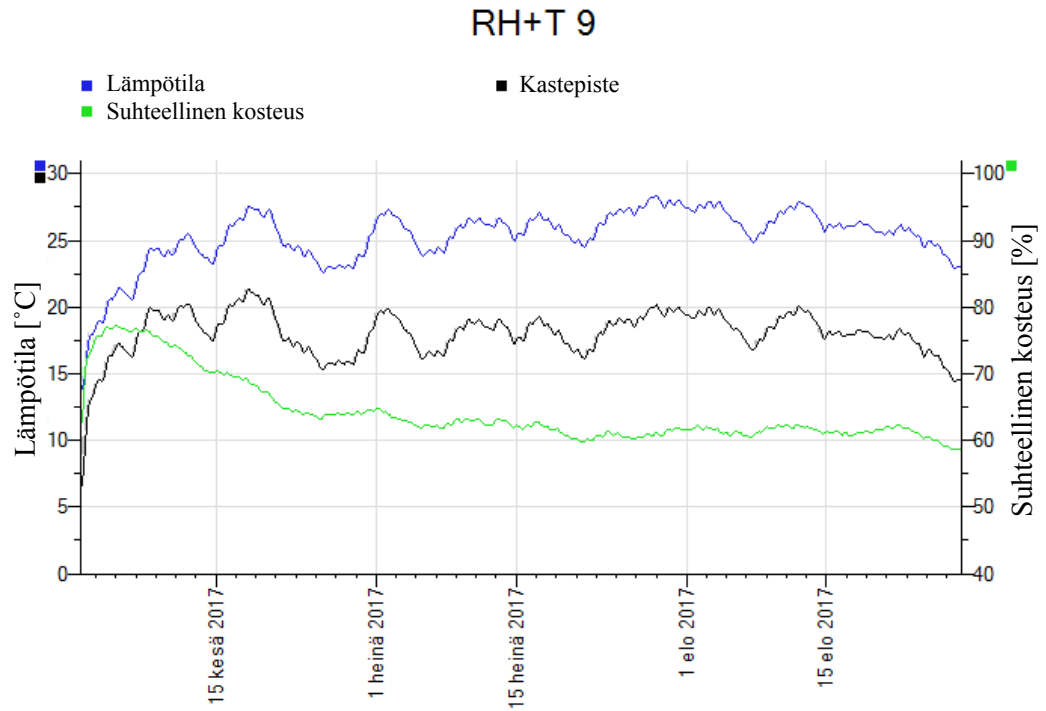


Kuva 58. Mittauspiste 1. Lämmittämättömän seinärakenteen mitatut kosteus- ja lämpöolosuhteet 100 mm:n syvyydessä.



Kuva 59. Mittauspiste 3. Lämmitetyn seinärakenteen mitatut kosteus- ja lämpöolosuhteet 100 mm:n syvyydessä.

Etelänpuooleisella seinällä suurin kuivattava vaikutus nähtiin mittauspisteessä 9 (Kuva 60), joka sijaitsi lämmityskaapeleiden ja kalsiumsilikaattilevyjen limityksen alla 100 mm:n syvyydellä alkuperäisestä seinäpinnasta. Tämän perusteella kalsiumsilikaattilevyn eristävä vaikutus siis pitää lämmitetyn seinärakenteen lämpimämpänä ja näin ollen tehostaa rakenteiden lämmittämisen kuivattavaa vaikutusta. Loput mittauksia tulokset on esitetty liitteessä 3.



Kuva 60. Mittauspiste 9. Lämmitetyn ja kalsiumsilikaattilevyllä peitetyn seinärakenteen lämpötila- ja kosteuskajaumat 140 mm:n syvyydeltä.

7 Pohdinta

Tavoitteet ja niiden saavuttaminen

Tämän diplomityön pääasiallisena tavoitteena oli luoda suomenkielinen yleiskatsaus Suomessa ennestään suhteellisen tuntemattomasta temperierung-menetelmästä sekä tutkia sen soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Työn taustatutkimuksessa löytyneiden esimerkkikohteiden ja niistä saatujen käyttäjäkokemusten sekä työtä varten tehtyjen mallinnusten perusteella menetelmän soveltuvuus Suomessa käytössä olevien kosteus-ongelmien korjausmenetelmien rinnalle on ilmeinen. Rajallisen ajan ja resurssien johdosta suurimmiksi avoimiksi kysymyksiksi tätä työtä tehdessä jäivät temperierung-menetelmän energiankulutus sekä suolojen käyttäytyminen rakenteita lämmitettäessä. Suolojen kohdalla huomionarvoista on kuitenkin niiden suhteellisen vähäinen esiintyvyys Suomen maaperässä.

Tavoitteiden mukaisesti luotiin temperierung-järjestelmän suunnittelua ja asentamista varten myös suuntaa antava ohjeistus pääasiassa olemassa olevan saksalaisen kirjallisuuden perusteella. Tulevaisuudessa menetelmän mahdollinen soveltaminen Suomessa tuo varmasti lisätietoa ja uusia näkökulmia luodun käyttöohjeistuksen kehittämistä varten. Diplomityön tuoman yleisen hyödyn lisäksi myös oma ymmärrys rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta on kasvanut huomattavasti työn tekemisen aikana. Temperierung-menetelmään syventyminen antaa myös työn tekijälle sekä ohjaajille hyvät lähtökohdat sen mahdolliseen hyödyntämiseen tulevaisuudessa.

Suoritettut tutkimukset

Suuresta kirjallisen tiedon keräämisestä johtuen oli suhteellisen pieni osa tästä diplomityöstä suoranaisesti uutta tieteellistä tutkimusta. Rakennusfysikaalisilla mallinnuksilla saatiin suuntaa antavaa tietoa siitä, millaisissa tyypillisissä suomalaisissa rakenteissa temperierung-menetelmää voidaan käyttää ja kuinka suuria tehoja siltä vaaditaan.

Koekohteen asennukset antoivat arvokasta kokemusta menetelmän käytöstä käytännössä. Kohteessa käynnissä olevat mittaukset luovat myös mahdollisuuden verrata rakennusfysikaalisia mallinnuksia todellisen rakenteen toimintaan. Alustavista kolmen kuu-kauden mittauksista ei kuitenkaan vielä tällä aikataululla voida päätellä paljoakaan. Mittauksiin käytetyt loggerit jätettiin kohteessa vielä paikoilleen, joten tämän työn valmistumisesta huolimatta menetelmän toimintaa seurataan ainakin vielä talven yli.

Työn merkitys

Kansainvälisessä mittakaavassa työ ei juurikaan tuonut uutta tietoa jo olemassa olevan tiedon rinnalle. Ennemmin tiedossa olevan menetelmän soveltuvuutta testattiin Suomessa tyypillisissä rakenneratkaisuissa sekä olosuhteissa. Työn mittaukset jouduttiin kuitenkin suorittamaan aikataulullisista syistä kesäaikana, minkä johdosta menetelmän soveltuvuus Suomen ääriolosuhteisiin jäi vielä hieman auki. Mallinnukset kuitenkin tukevat ympärivuotista käyttöä ainakin kosteudenhallintamenetelmänä.

Työn todellinen merkitys suomalaisen korjausrakentamisen kannalta jää nähtäväksi tulevaisuudessa. Suomenkielisen tiedon puuttumisen luoma kynnys menetelmän käytölle on ainakin poistettu. Nyt luodut suuntaa antavat ohjeet luovat suunnittelijoille suhteellisen helpon mahdollisuuden menetelmän käyttöönottoon.

8 Johtopäätökset

Tätä diplomityötä varten tehtyjen kirjallisuuskatsauksen, mallinnusten sekä koemittauksen alustavien tietojen perusteella temperierung-menetelmä ja sen erilaiset sovellukset ovat potentiaalisia vaihtoehtoja Suomessa käytettävien kosteusongelmien korjausmenetelmien rinnalle. Joitakin ongelmia menetelmän käytössä kuitenkin esiintyy ja varsinkin lämmitysjärjestelmänä käytettäessä se tarvitsee vielä lisätutkimuksia olemassa olevassa kirjallisuudessa esiintyvien ristiriitaisuuksien johdosta.

Rakenteiden kohdennetun lämmittämisen käyttäminen kosteusongelmaisten rakennusten korjausmenetelmänä perustuu rakenteiden kuivumiskyvyn parantamiseen lämpöenergian avulla. Lämmittämisen vaikutuksen suuruus rakenteiden kuivumiskykyyn riippuu hyvin paljon rakenteissa käytetyistä materiaaleista, kerrospaksuuksista ja rakenneratkaisuista. Myös lämmitysputkien tai -kaapeleiden sijoittelulla ja teholla voidaan vaikuttaa olennaisesti niiden toimivuuteen kussakin kohteessa. Suurin osa menetelmää koskevista tutkimuksista on todennut sen soveltuvuuden kosteusongelmaisten rakennusten korjaamiseen, jos kosteuslähde on tiedossa ja menetelmän suunnittelu sekä mitoitus on tehty oikein.

WUFI® 2D:llä suoritettujen mallinnusten sekä koejärjestelyiden perusteella erilaiset rakenteet ja niiden kastumistavat vaativat hyvinkin erilaisia ja eritehoisia lämmitysratkaisuja. Esimerkiksi kapillaarisen kosteusvirran kuivattavaksi ratkaisuksi riittää ohuimmissa rakenteissa parhaimmillaan yksikin seinän alareunaan asennettu kohtuullisen pienitehoinen lämmityskaapeli tai vesikiertoinen putki. Paksummissa rakenteissa seinään tulee johtaa luonnollisesti enemmän lämpöenergiaa saman vaikutuksen aikaansaamiseksi. Tämä voidaan toteuttaa joko lisäämällä lämmitysputkilinjoja tai nostamalla järjestelmän tehoa. Tapauksissa, joissa sadevesi imeytyy rakenteeseen esimerkiksi luonnonkivisen julkisivun huokosten saumojen läpi, voi koko seinän kattava lämmitys olla tarpeellinen. Kosteusongelmien korjauksissa on kuitenkin huomioitava, ettei temperierung-menetelmällä voida estää paineellisen veden pääsyä rakenteisiin. Menetelmä saattaa myös joissakin tapauksissa kiihdyttää esimerkiksi maaperästä rakenteisiin nousevaa kosteusvirtaa, vaikka rakenteen sisempien kerrosten kosteuspitoisuudet laskevat.

Korjausmenetelmänä temperierungin vahvimpiin etuihin muihin menetelmiin nähden kuuluu ehdottomasti sen yksinkertainen ja suhteellisen vähän rakenteita rikkova asennus vanhaankin kohteeseen. Jälkikäteen tehtynä kiinteän kapillaarikatkon asentaminen tai sokkelin ulkopuolisen vedeneristyksen uusiminen vaativat yleensä huomattavasti suurempia toimenpiteitä kuin sisäpuolisten lämmitysputkien asentaminen. Erityisen herkissä tai esimerkiksi kulttuurihistoriallisesti merkittävissä rakennuksissa temperierung-järjestelmän vaikutus rakenteiden stabiiliuteen ja ulkonäköön voidaan minimoida seinän pintaan tai erillisen listan sisälle jäävällä asennuksella.

Haittapuolena tavanomaisiin korjauksiin nähden voidaan pitää menetelmän vaatimaa jatkuvaa energiankäyttöä ja ajoittaista järjestelmän huoltoa. Energiankäyttö kuitenkin kompensoituu ainakin osittain lämmityskaudella rakennuksen muissa lämmitysjärjestelmissä tapahtuvan säästön johdosta. Kesäkaudella rakenteiden lämmittämisen haittapuoleksi on useammassakin kohteessa osoittautunut liian korkeaksi noussut sisäilman lämpötila. Mallinnusten perusteella menetelmä ei myöskään välttämättä riitä kuivattamaan hyvin paksuja rakenteita. Menetelmän käytön järkevyys onkin arvioitava aina tapauskohtaisesti joko kokemuseräisen tiedon tai mallintamisen avulla.

Temperierung-menetelmän vaikutuksista suolojen käyttäytymiseen rakenteissa on hyvin vähän tietoa saatavilla. Menetelmän kohteista saadun kokemuseräisen tiedon perusteella rakenteiden lämmittäminen saattaa kohteesta riippuen joko parantaa tai pahentaa suolojen aiheuttamia ongelmia. Suolojen kerääntyminen siirtyy kuitenkin tyypillisesti rakenteen pinnalta syvemmälle siirtyneeseen kosteuden haihtumisvyöhykkeeseen. Temperierung-menetelmän ja suolojen yhteisvaikutus rakenteisiin vaatii vielä lisätutkimuksia.

Seinäarakenteen kuivumisen hyödyiksi voidaan yleensä laskea muun muassa homeenkasvun riskin pieneneminen, seinän lämmöneristävyyden paraneminen ja materiaalien parempi säilyminen. Homesienille otolliset olosuhteet huononevat suhteellisen kosteuden laskiessa sekä seinän pinnalla että sen sisällä. Useimmissa materiaaleissa korkea kosteuspiitoisuus johtaa myös suurempaan lämmönjohtavuuteen, minkä johdosta kuivuminen yleensä parantaa rakennekerrosten lämmöneristävyyttä. Vaikutus jää kuitenkin huomattavasti pienemmäksi useimmilla nykyisin käytössä olevilla eristemateriaaleilla kuin esimerkiksi hygroskooppisilla kivipohjaisilla materiaaleilla. Rakenteiden lämmittämisen lämmöneristävyyttä parantava vaikutus on siis suurin huonosti eristetyillä tai eristämättömillä massiivisilla kivirakenteilla. On myös huomionarvoista, että aineen lämpötilan nousu päivittäin pienentää sen lämmöneristävyyttä. Tästä johtuen valmiiksi kuivissa rakenteissa lämpötilan nostaminen saattaa pahimmassa tapauksessa johtaa jopa lämmöneristävyyden huonontumiseen.

Rakennusten kosteusongelmien ehkäisyn lisäksi temperierung-menetelmä soveltuu monien julkaisujen mukaan myös lämmitysjärjestelmäksi. Lämmitysjärjestelmän energiatehokkuudesta on kuitenkin saatavilla runsaasti hyvinkin ristiriitaista tietoa. Tämän työn puitteissa ei ollut mahdollista tutkia menetelmän energiankulutusta. Kirjallisuuden perusteella energiatehokkuus riippuu kuitenkin suurelta osin ainakin temperierung-järjestelmän toteutuksesta, rakennuksen rakenneratkaisuista ja lähtötilanteen kosteuspiitoisuuksista rakenteissa. Menetelmän energiatehokkuutta on perusteltu erityisesti rakenteiden kuivumisen myötä parantuneella lämmöneristävyydellä sekä säteilyyn perustuvan lämmityksen nostamalla operatiivisella lämpötilalla, joka mahdollistaa huoneilman lämpötilan laskemisen. Joidenkin tutkijoiden mukaan nämä eivät kuitenkaan riitä kompensoimaan suoraan seinäarakenteen läpi ulos johtuvan lämpöenergian määrää.

Temperierung-menetelmän lämpö- ja kosteusolosuhteita tasaavan vaikutuksen vuoksi sitä on käytetty ja tutkittu Keski-Euroopassa erityisesti museoiden ja muiden historiallisten rakennusten sisäilmaston hallinnan kannalta. Seinäarakenteita lämmittämällä taasoittuvat huoneilman ja ympäröivien pintojen lämpötila- ja kosteusjakaumat, minkä johdosta seiniin ja seinillä oleviin näyttelyesineisiin mahdollisesti kerääntyvän kondenssiveden riski pienenee oleellisesti. Esimerkiksi Saksassa ja Itävallassa on temperierung-menetelmällä ehkäisty näyttelytiloissa taulujen taakse kondensoituneen veden aiheuttamia ongelmia.

Säteilyyn perustuvan lämmityksen on todettu soveltuvan myös ilman suhteellisen kosteuden nostamiseen ilman, että absoluuttista kosteuspiitoisuutta muutetaan. Tämä perustuu saman operatiivisen lämpötilan luomiseen alhaisemmalla sisäilman lämpötilalla, kun lämpöenergia ohjataan säteilyä ihmisten oleskelualueelle. Hyöty tulee esille erityisesti kylmimpinä kuukausina, jolloin sisäilman suhteellinen kosteuspiitoisuus on tyypillisesti alimmillaan.

Käytännöllisyyden kannalta temperierung-menetelmän hyötyjä ovat muun muassa sen suhteellisen huomaamaton asennus, joka myös mahdollistaa tavanomaista patterilämmi-

tysjärjestelmää huomattavasti vapaamman kalusteiden sijoittelun. Myös pölyntyminen ja sitä kautta siivouskulut vähenevät, kun konvektiovirtaukset pienenevät ja pölyä keräävät patterit voidaan jättää asentamatta. Lämmitysjärjestelmän näkymättömyys on myös erityisesti historiallisten rakenteiden kannalta huomionarvoinen asia.

Tätä diplomityötä varten tehtyjen mallinnusten perusteella järjestelmän mitoitus on hyvin tärkeässä roolissa sen toimivuuden kannalta. Joissakin tapauksissa temperierung-menettelmän hyödyt voidaan aikaansaada jo hyvinkin matalilla alle 30 °C:n lämmitysputkien lämpötiloilla. Toisaalta pahimmassa tapauksessa massiivisessa seinässä edes korkeilla lämpötiloilla ei saavuteta haluttuja lopputuloksia, kun lämpöenergia ei kulkeudu tarpeeksi syvälle rakenteen sisälle. Tästä syystä korjauksen alkutilanne ja lähtöarvot tulisi selvittää mahdollisimman huolellisesti ja mallintaa tarvittaessa tarkoitukseen soveltuvalla ohjelmalla. Temperierung-menettelmää on hyvä verrata jokaisen kohteen kohdalla erikseen myös muihin mahdollisiin korjaustapoihin.

Sovellettaessa temperierung-menettelmää Suomessa, olisi hyvä ainakin ensimmäisissä kohteissa seurata sen toimintaa ja raportoida kokemuksia tiedon lisäämiseksi. Näin mahdollistetaan osallistuminen menetelmän kansainväliseen kehitystyöhön ja vältetään toistamista jo kerran tehtyjä virheitä. Myös tämän työn yhteydessä tehtyjä mittauksia jatketaan vielä vuoden ajan. Vaikka temperierung-menettelmää on tutkittu Keski-Euroopassa jo useamman vuosikymmenen ajan, on luotettavaa tutkimustietoa sen toimivuudesta erilaisissa rakenteissa ja toimintaympäristöissä vielä rajoitetusti saatavilla. Menetelmä vaatisi jatkotutkimuksia erityisesti energiankulutukseen sekä suoloihin liittyvissä kysymyksissä. Energiankulutuksen tutkiminen vaatisi syventymistä varsinkin erilaisten rakenteiden vaikutuksesta temperierung-järjestelmän toimintaan. Näin voitaisiin arvioida tarkemmin menetelmän soveltuvuutta myös nykyaikaisten rakennusten lämmitysjärjestelmäksi.

Oikein käytettynä seinärakenteiden lämmittäminen temperierung-menettelmällä voi olla toimiva ratkaisu lämmitysjärjestelmäksi, kosteudenhallintamenetelmäksi, korjausmenetelmäksi tai näiden yhdistelmäksi. Menetelmä kuitenkin vaatii lisätutkimuksia ja erityisesti energiankäyttöä vertailevia tutkimuksia. Toivon mukaan Stefan Bichlmairin työn alla oleva väitöskirja tuo kaivattua lisätietoa ja selventää käsityksiä menetelmästä.

Lähdeluettelo

1. **Palviainen, T.** *Maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinta sisäpuolisilla korjausmenetelmillä.* Diplomityö. Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto, 2009. 122 s.
2. **Siikanen, U.** *Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia.* Tampere : Rakennustieto Oy, 2014. 256 s. ISBN: 978-952-267-001-4.
3. **C4. SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMA, Lämmöneristys ohjeet.** Helsinki : Ympäristöministeriö, 2003.
4. **Tuomaala, P.** *Ihmisen lämpöaistimuksen uusi arviointimenetelmä.* Teoksessa: Koskenvesa A. & Heloma T. & Laine S. *Rakentajain kalenteri.* Helsinki : Rakennustieto Oy, 2013. S. 105-122. ISSN 0355-550X.
5. **Laine, K.** *Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet.* Diplomityö. Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto, 2010. 122 s.
6. **Pitkäranta, M.** *Ympäristöopas 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus.* Helsinki : Ympäristöministeriö, 2016. 234 s. ISBN 978-952-11-4626-8.
7. **Franzoni, E.** Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Costruction and Building Materials.* Vol 54. 2014. S. 123-136. ISSN 0950-0618.
8. **RT05-10710. KOSTEUS RAKENNUKSISSA.** Rakennustieto Oy, 1999. 8 s.
9. **Vinha, J. & Heljo, J. & Lähdesmäki, K. & Pentti, M. & Suonketo, J. & Åström, G.** *RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset.* Helsinki : Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2014. 500 s. ISBN 978-951-758-589-7.
10. **Vinha, J. & Valovirta, I. & Korpi, M. & Mikkilä, A. & Käkelä, P.** *Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.* Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio, 2005. 101 s. ISBN 978-952-15-2745-6.
11. **Lakatos, Á ja Kalmár, F.** *Examination of the change of the overall heat transfer coefficients of building structures in function of water content.* Building Services Engineering Research & Technology. Vol 35:5. 2014. S. 507-515. ISSN 1477-0849.
12. **Frössel, F.** *Mauerwerkstrochenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat.* Stuttgart : Fraunhofer Irb, 2002. 556 s. ISBN 3816761267.
13. **Kook-Han, K. & Sang-Eun, J & Jin-Keun, K. & Sungchul, Y.** *An experimental study on thermal conductivity of concrete.* Cement and Concrete Research. Vol. 33. 2003. S. 364-371. ISSN 0008-8846.
14. **WUFI®.** *Material Database.* Fraunhofer IBP. [Viitattu 1.6.2017].
15. **Neuvonen, P. & Mäkiö, E. & Malinen, M.** *Kerrostalot 1880-1940.* Hämeenlinna : Rakennustieto Oy, 2002. 192 s. ISBN 951-682-668-7.
16. **Mesimäki, P. ja Harmaajärvi, R.** *Luonnonkivet ja julkisivut.* Hanko : Rakennuskirja Oy, 1989. 112 s. ISBN 951-682-175-8.
17. **Lahdensivu, J.** *Luonnonkiviverhottujen massiivitiiliseinien vaurioituminen ja korjausperiaatteet.* Lisensiaatintyö. Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto, 2003. 156 s. ISBN 952-15-1118-4.
18. **Khan, M.I.** *Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models.* Building and Environment. Vol. 37:6. 2002. S. 607-614. ISSN 0360-1323.
19. **Mirtič, M. & Stegnar, G. & Šijanec Zavrl, M.** *The Wall Heating System (Temperierung) at Brezice Castle in Slovenia.* München : Climate for Culture, 2014.
20. **Soimakallio, H.** *Rakennetun omaisuuden tila.* Helsinki : ROTI, 2017.
21. **Großeschmidt, H.** *The Tempered Building: Renovated Architecture - Comfortable Rooms - A "Giant Display Case".* Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großeschmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings:*

- Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol 9. 2004. S. 14-48. ISBN 3-901 568-51-4.*
22. **Löther, T.** *Untersuchungen zur Temperierung historischer Gebäude.* Hamburg : disserta Verlag, 2014. 240 s. ISBN 3954254840.
 23. **Kippes, W. & Kotterer, M. & Großes Schmidt, H. & Boody, F. P.** *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol. 9. 2004. 506 s. ISBN 3-901 568-51-4.*
 24. **Holmberg, J.** Comparison of Tempering and Conventional Convection Heating. Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großes Schmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol 9. 2004. S. 99-106. ISBN 3-901 568-51-4.*
 25. **Holmberg, Jan.** *Sähköposti.* 3. 11 2016.
 26. **Pihkala, Antti.** *Kirkkohallituksen yliarkkitehti. Puhelu.* 31. 1 2017.
 27. **Mikonsaari, Petri.** *Suomenlinnan hoitokunnan rakennuttaja-arkkitehti. Suomenlinnan kohdekäynti, haastattelu.* 6. 4 2017.
 28. **Mäki-Ruuti, N.** *Korjatun luonnonkivijulkisivun kosteustekninen toiminta, Diplomityö.* Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto, 2010. 98 s.
 29. **Bichlmair, S. & Raffler, S. & Kilian, R.** The Tempering heating systems as a retrofitting tool for the preventive conservation of historic museums buildings and exhibits. *Energy and Buildings.* Vol. 95. 2015. S. 80-85. ISSN 0378-7788.
 30. **Kleinmanns, J.** Tempering of Historical Buildings: A Method for Preventing Building Damage Due to Moisture. Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großes Schmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering.* Wien : Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol. 9, 2004. S. 201-208.
 31. **Krus, M. ja Kilian, R.** *Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung - Feuchtetechnische und Wärmetechnische Aspekte.* Berlin : Fourth German-Austrian IBPSA Conference, BauSIM, 2012. S. 46-52.
 32. **Dominik, A. & Koch, S.** *Die Wirkung eines Heizsystems („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutztem Gebäude.* Osnabrück : Dominik Ingenieurbüro, 2008. 72 s.
 33. **Bichlmair, Stefan.** *Sähköposti.* 6. 7 2017.
 34. **Käferhaus, J.** *Historic Buildings as Museums: Sustainability and energy saving in museums, depots, churches and historic buildings.* Teoksessa: Kilian, R. & Vyhliadal, T. & Broström, T. *Developments in Climate Control of Historic Buildings.* Wien : Fraunhofer IRB Verlag, 2010. S. 29-37. ISBN 978-3-8167-8637-5.
 35. **Kilian, R. & Bichlmair, S. & Krus, M.** Evaluation of different wall heating systems in historic monuments - Aspects of Energy and Conservation. Teoksessa: de Bouw, M. & Dubois, S. & Dekeyser, L. & Vanhellemont, Y. (toim.) *Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings. Second International Conference Proceedings.* Brussels : Belgian Building Research Institute, 2016. S. 158-164.
 36. **Käferhaus, J.** 25 Jahre Temperierung. Eine kritische Analyse. Teoksessa: Pfeil, M. & Pellengahr, A. (toim.) *Die Temperierung: Beiträge zum aktuellen Forschungsstand.* München : Volk Verlag, 2014. S. 75-81. ISBN 978-3-86222-144-8.
 37. **Mikonsaari, Petri.** *Suomenlinnan hoitokunnan rakennuttaja-arkkitehti. Sähköposti.* 20.4.2017.
 38. **Kotterer, M.** *Climate Measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg: Analysis and Documentation.* Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großes Schmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol. 9. 2004. S. 245-267. ISBN 3-901 568-51-4.*

39. **Šijanec-Zavrl, M. & Žarnić, R.** *Thermal Response of Wall-Tempered Heritage Buildings*. Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großeschmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol. 9*. 2004. S. 107-127. ISBN 3-901 568-51-4.
40. **Becker, T.** *The Italian Experience*. Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großeschmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol 9*. 2004. S. 423-430. ISBN 3-901 568-51-4.
41. **Leipoldt, D.** *A Short Report on the Reduction of Heating Costs, Energy Use and Investment Costs through the use of Tempering for Heating Buildings: A Comparative Study in the Waldstraße Gymnasium in Hattingen Germany*. Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großeschmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol. 9*. 2004. S. 215-219. ISBN 3-901 568-51-4.
42. **Großeschmidt, H.** *Energetische Gebäudesanierung, Raumbeheizung, Kondensat-/Schimmelschutz und Trockenlegung durch Einsatz von Sockelheizrohren (Temperieranlage)*. Denkma[i]l, Nachrichten der Initiative Denkmalschutz. 2012. Vol. 11. S. 20-23. ISSN 2219-2417.
43. **Simone, A. & Babiak, J. & Bullo, M. & Landkilde, G. & Olesen, B. W.** *Operative temperature control of radiant surface heating and cooling systems*. Teoksessa: Säteri, J. & Seppänen, O. (toim.) *Proceedings of Clima 2007 Wellbeing Indoors*. Helsinki : FINVAC ry, 2007. S. 3458-3465. ISBN 978-952-99898-2-9.
44. **Mikonsaari, P.** *Rakennuksen C 58 kosteusongelmat*, raportti. Helsinki : Suomenlinnan hoitokunta, 2011. 7s.
45. **Foreca Oy.** Sää. [Online] [Viitattu 7.4.2017]. Saatavissa: <http://www.foreca.fi>.
46. **Ilmatieteen laitos.** Tuuliruusut. [Online] [Viitattu: 1.6.2017.] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tuuliruusut>.
47. **SFS-EN ISO 10456 + AC.** *Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. 2. painos*. Helsinki : Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2008. 30 s.
48. **Blades, Nigel ja Rice, Kristy.** *Conservation heating and energy efficiency at the National Trust : Theory and practice*. Teoksessa: Kilian, R. & Vyhlihal, T. & Broström, T. *Developments in Climate Control of Historic Buildings*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2010, ss. 13-19.
49. **Luciani, A.** *Is temperierung energy efficient? The Application of and old-new heating system to heritage buildings*. Teoksessa: López Sánchez, M. *Energy efficiency in historic buildings*. Madrid : Fundación de Casas Históricas y Singulares, Fundación Ars Civilis, 2014, ss. 366-379.
50. **Reuther, M. ja Steffens, O.** *Evaluation der Bauteiltemperierung für den Herzogskasten Abensberg*. 2015, Bauphysik, Osa/vuosik. 37(2), ss. 96-99.
51. **Lehtinen, T. ja Viljanen, M.** *Tiilirakenteiden kapillaarinen kosteuden siirtyminen sisätiloihin rajoittuvissa rakenteissa*. Espoo : Talonrakennustekniikan laboratorio, 1994. ISBN 951-22-2288-4.
52. **Ranacher, M.** *Gesundheit durch thermische Kondensatprävention Optimales Gebäudeklima für Kulturgut in Museen und Denkmalpflege*. Teoksessa: Kippes, W. & Kotterer, M. & Großeschmidt, H. & Boody, F. P. *Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Vol 9*. 2004. S 431-461. ISBN 3-901 568-51-4.

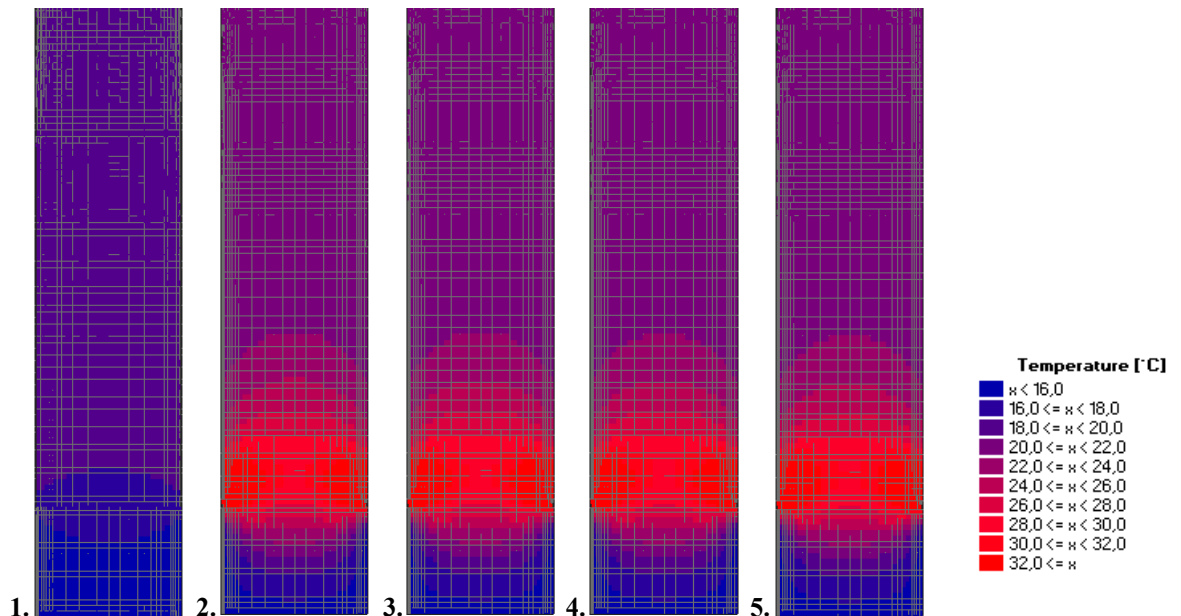
Liiteluettelo

Liite 1. Tiilirakenteisen maanvaraisen seinän lämpötila- ja vesimääräjakaumat

Liite 2. Maanvastaisen betonisandwichseinän lämpötila- ja vesimääräjakaumat

Liite 3. Koekohteen mittausdata

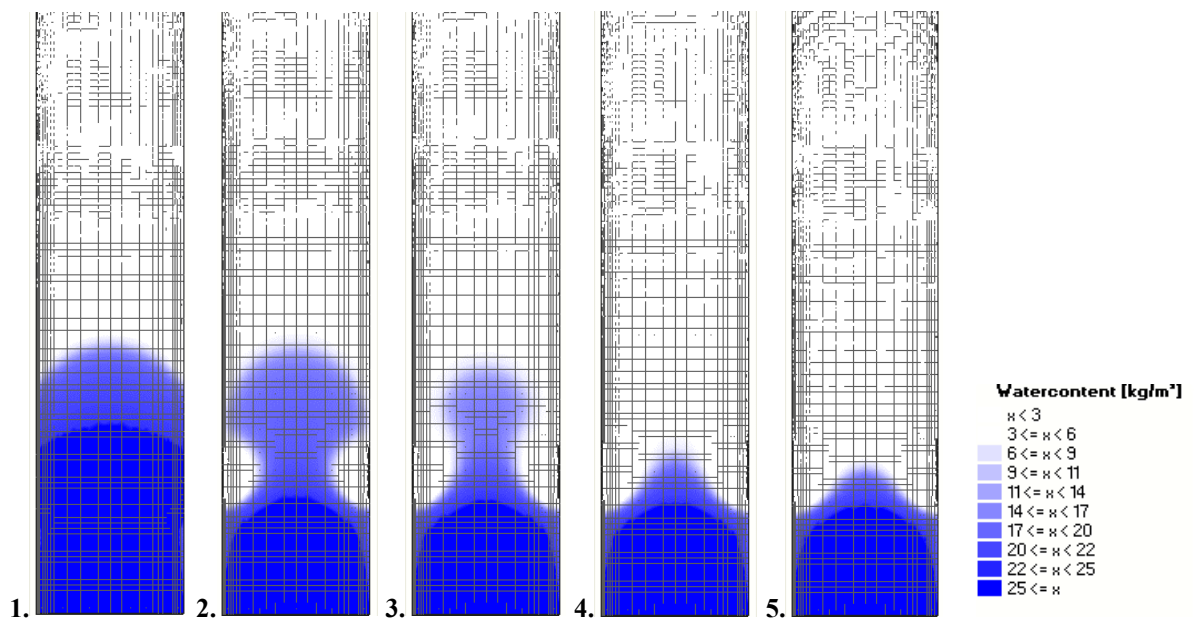
Liite 1. Tiilirakenteisen maanvaraisen seinän lämpötila- ja vesimääräjakaumat (Kappale 5.2)



Kuva 61. Tiiliseinän lämpötilajakaumat vasemmalta alkaen:

1. Lähes tasaopainotila juuri ennen lämmitysputkien asentamista 31.12.2022
2. Kuusi kuukautta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
3. Vuosi lämmitysputkien asentamisen jälkeen
4. Kaksi vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
5. Kuusi vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen

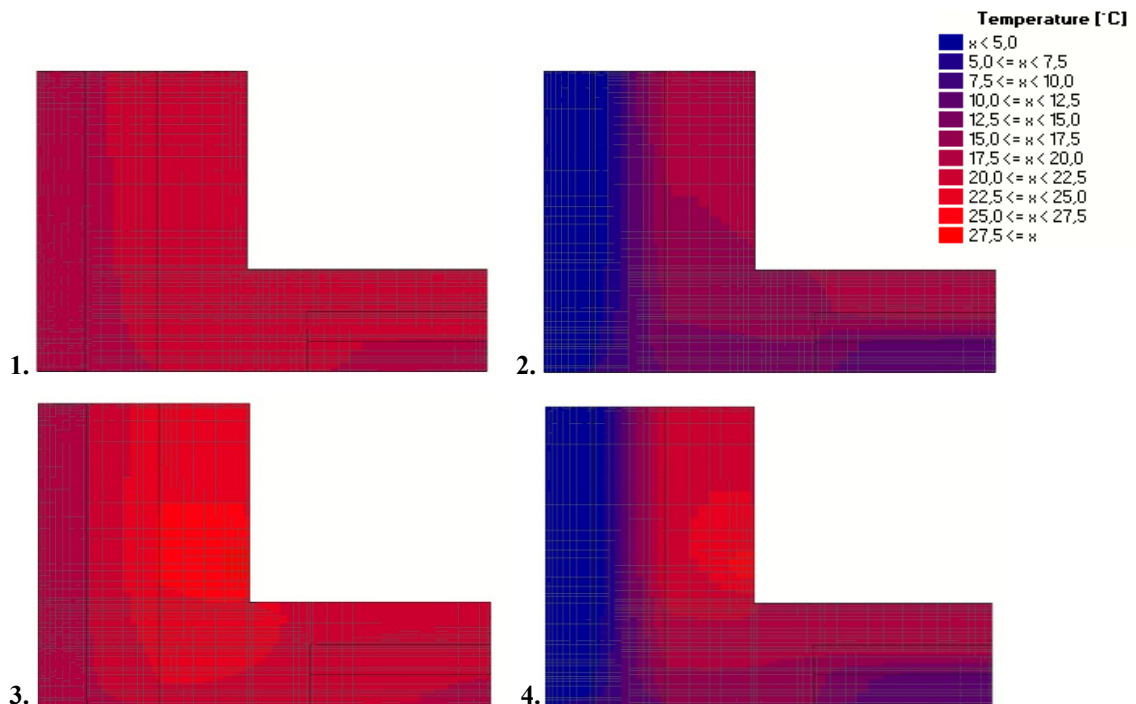
Kuten kuvista voi nähdä, tasoittuu rakenteen lämpötilajakauma käytännössä jo kuudessa kuukaudessa eli huomattavasti nopeammin kuin sen kosteusjakauma.



Kuva 62. Tiiliseinän vesimääräjakaumat vasemmalta alkaen:

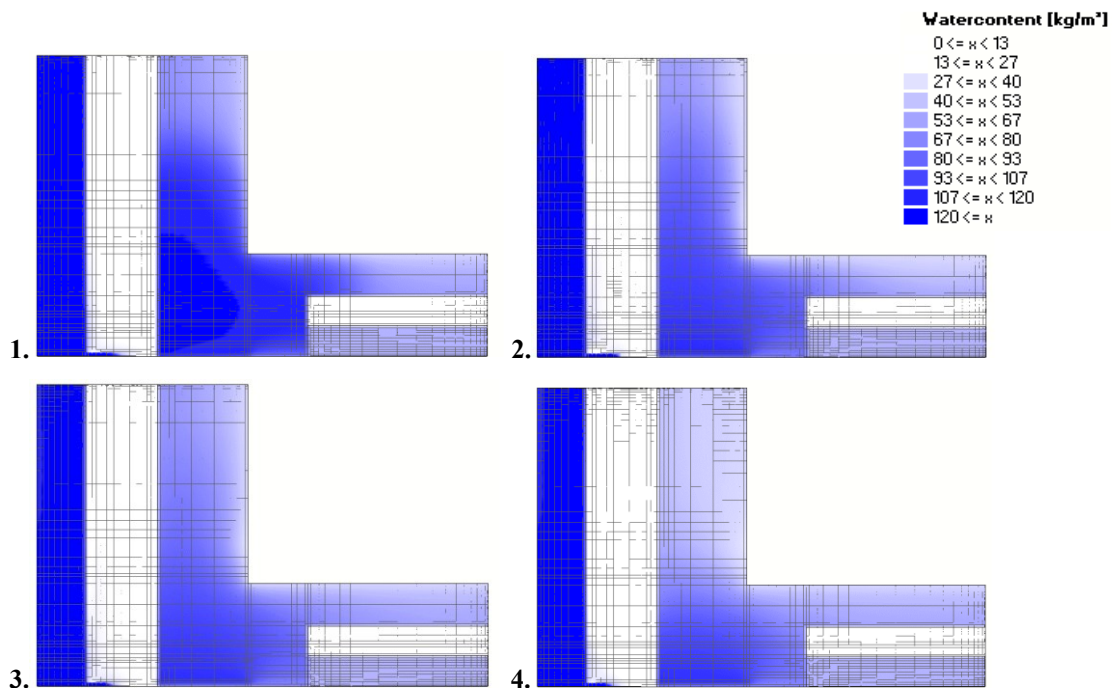
1. Lähes tasaopainotila juuri ennen lämmitysputkien asentamista 31.12.2022
2. Kuusi kuukautta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
3. Vuosi lämmitysputkien asentamisen jälkeen
4. Kaksi vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
5. Kuusi vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen

Liite 2. Maanvastaisen betonisandwich-seinän lämpötila- ja vesimääräjakaumat (20 W/m) (Kappale 5.3)



Kuva 63. Betonisandwich-seinän kesä- ja talviaikaiset lämpötilajakaumat ennen ja jälkeen temperierung-järjestelmän asennuksen:

1. Heinäkuinen lämpötilajakauma ennen lämmitysputkien asentamista 31.7.2019
2. Tammikuinen lämpötilajakauma ennen lämmitysputkien asentamista 31.1.2019
3. Heinäkuinen lämpötilajakauma lämmitysputkien asentamisen jälkeen 31.7.2027
4. Tammikuinen lämpötilajakauma lämmitysputkien asentamisen jälkeen 31.1.2028

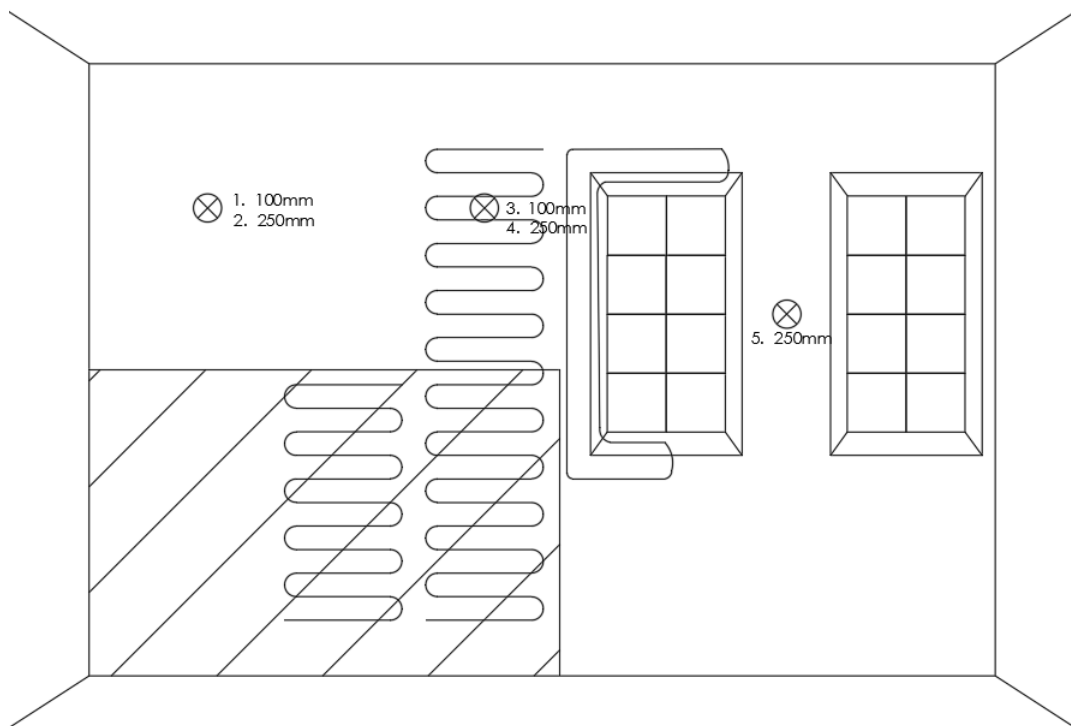


Kuva 64. Tiiliseinän vesimääräjakaumat vasemmalta alkaen:

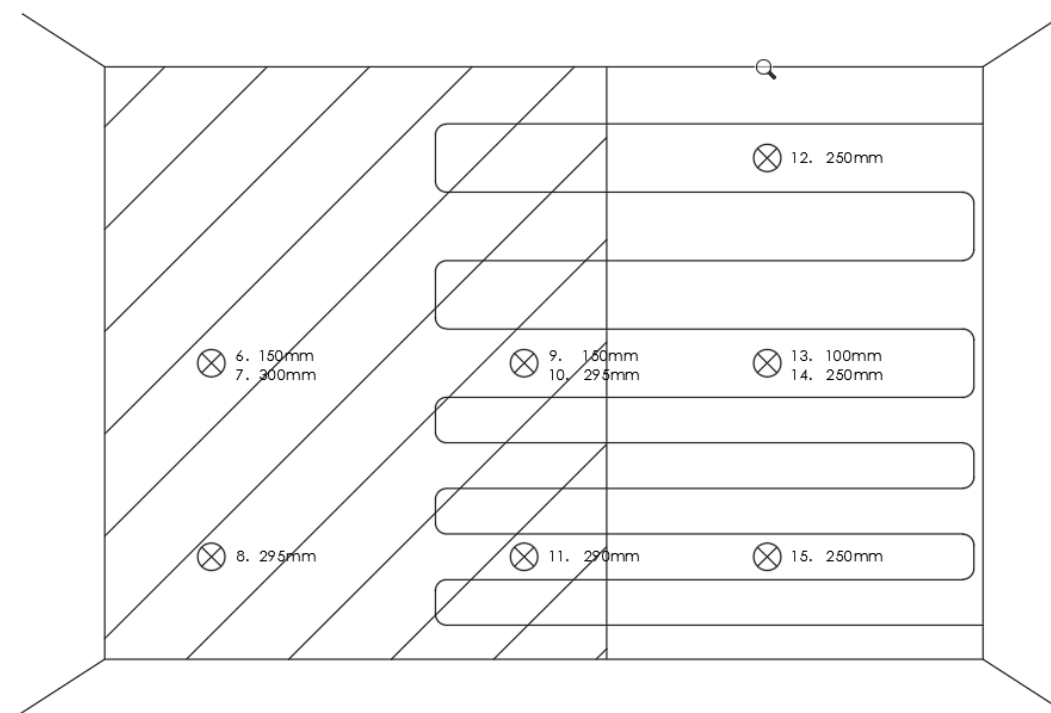
1. Lähes tasaopainotila juuri ennen lämmitysputkien asentamista 8.11.2019
2. Kuusi kuukautta lämmitysputkien asentamisen jälkeen
3. Vuosi lämmitysputkien asentamisen jälkeen
4. Lähes tasapainotila 8 vuotta lämmitysputkien asentamisen jälkeen

Liite 3. Koekohteen mittausdata

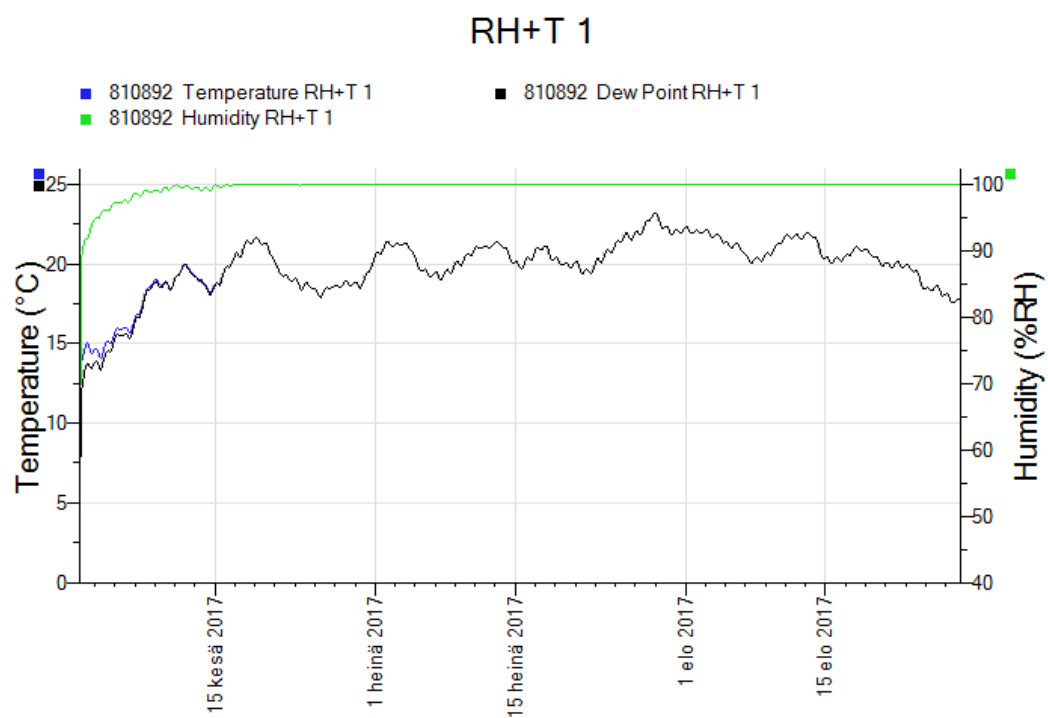
Tässä liitteessä on esitetty koekohteen mittauspisteiden sijainnit seinillä sekä työn kanalta olennaisimpien mittauspisteiden tulokset.



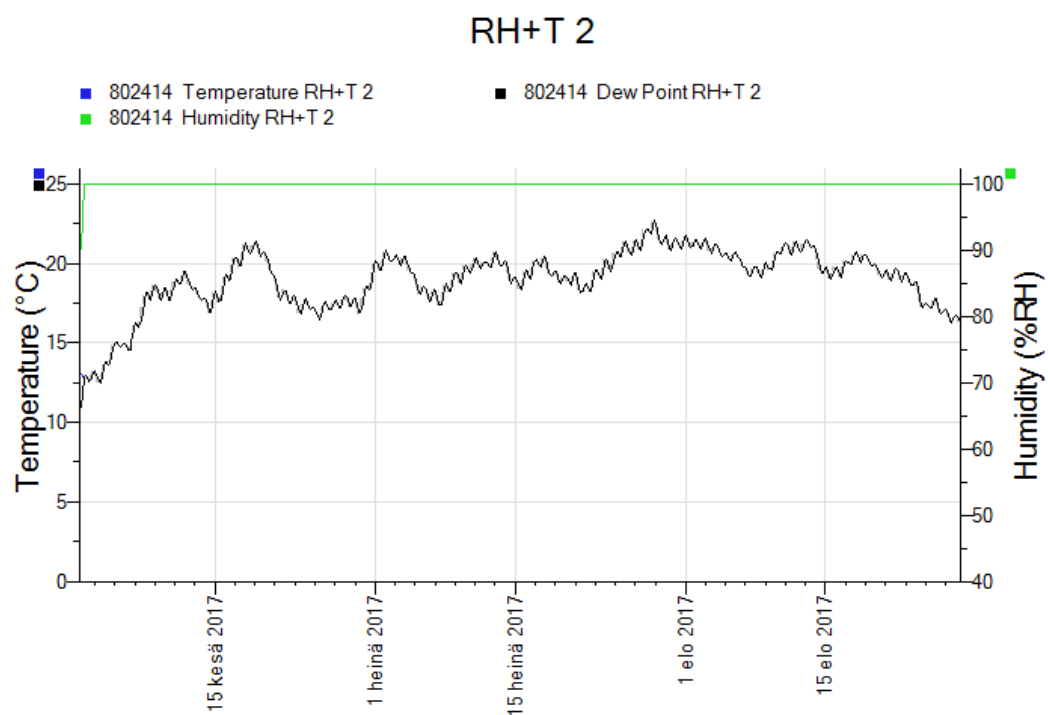
Kuva 65. Mittauspisteiden sijainnit pohjoisen suuntaan olevalla seinällä.



Kuva 66. Mittauspisteiden sijainnit etelän suuntaan olevalla seinällä.

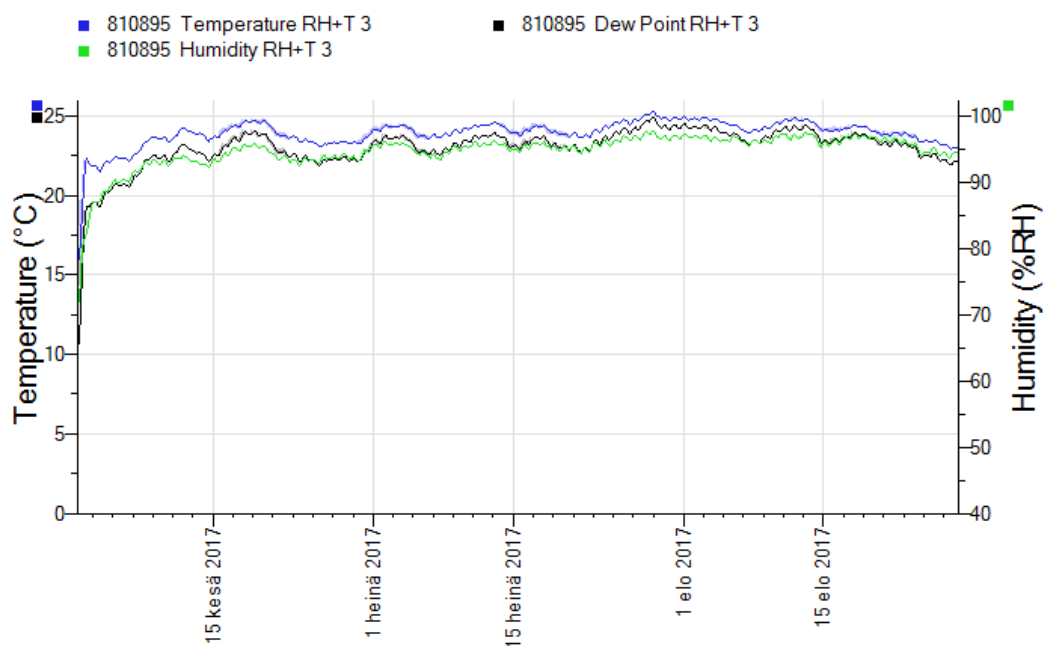


Kuva 67. Mittauspiste 1. Lämmittämätön seinä 100 mm:n syvyydessä.



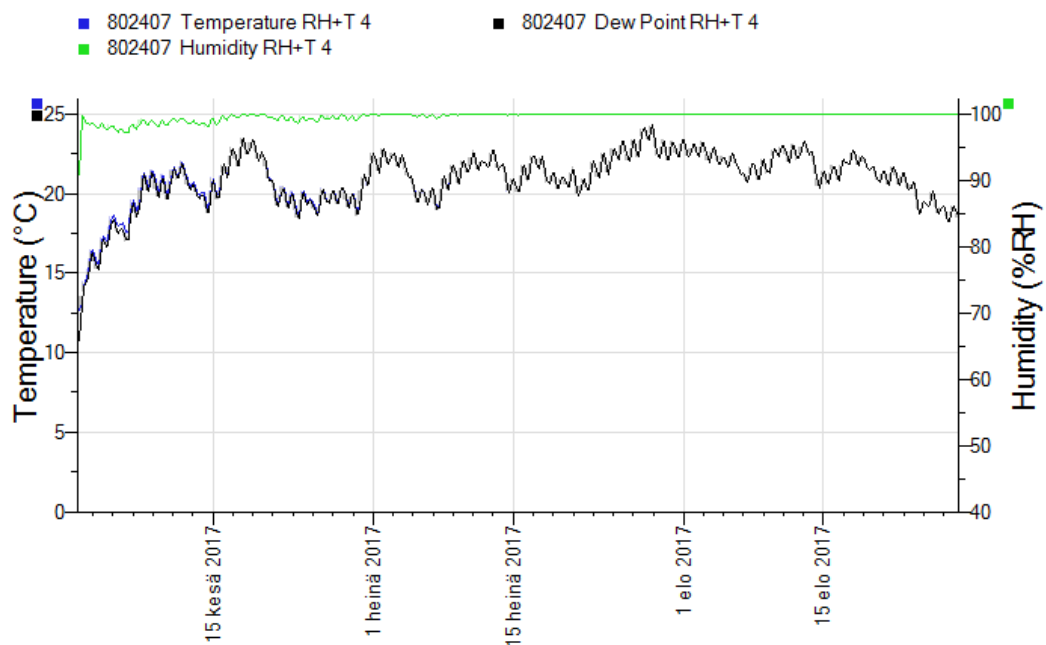
Kuva 68. Mittauspiste 2. Lämmittämätön seinä 250 mm:n syvyydessä.

RH+T 3



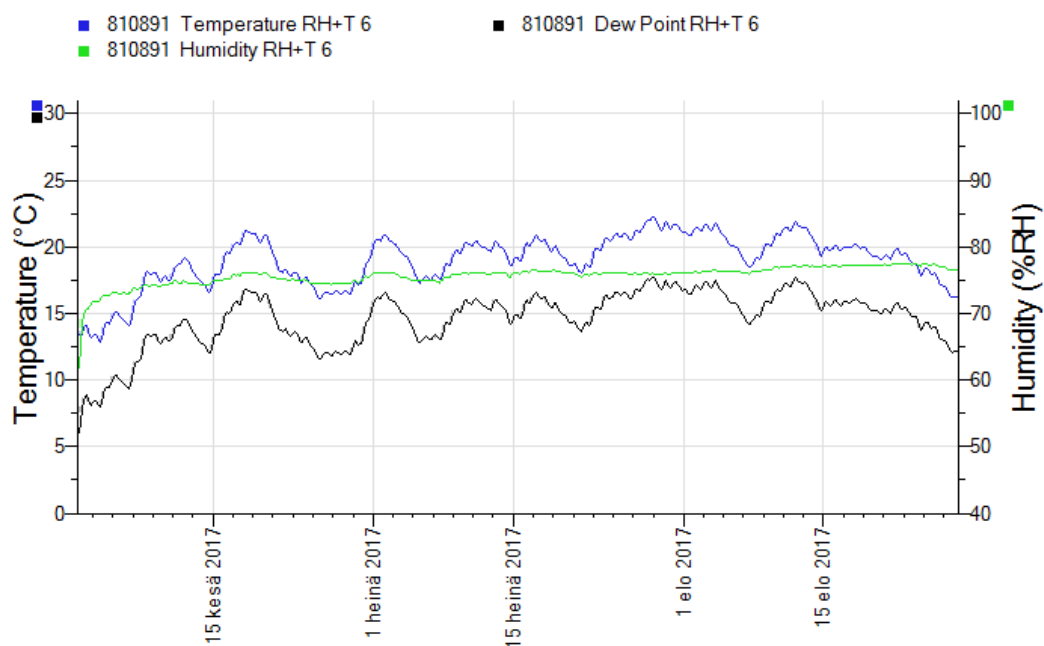
Kuva 69. Mittauspiste 3. Lämmitetty seinä 100 mm:n syvyydessä.

RH+T 4



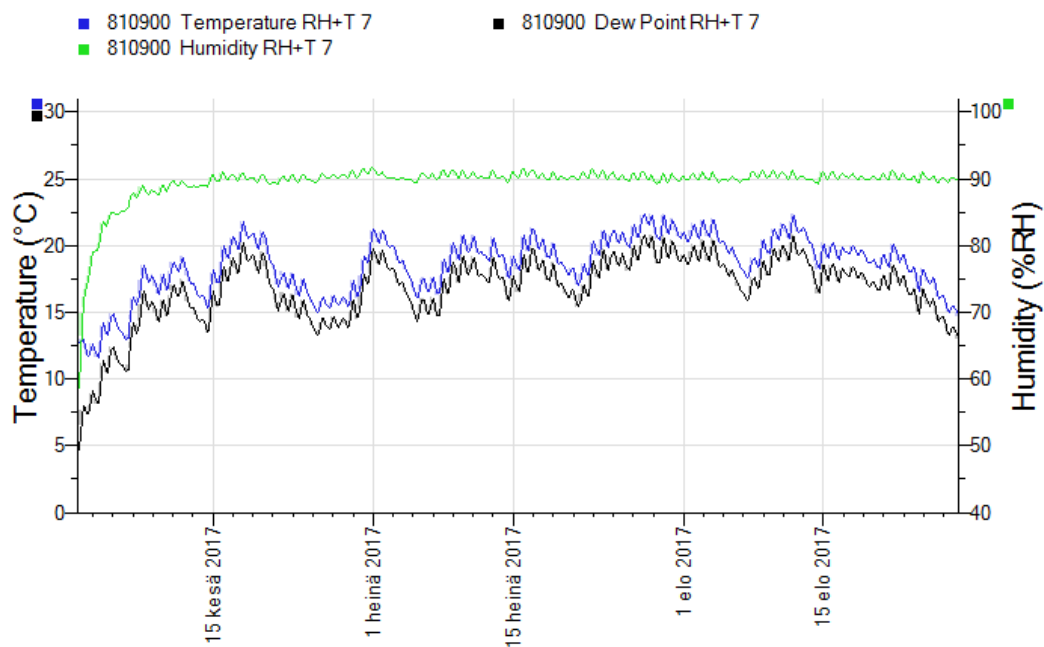
Kuva 70. Mittauspiste 4. Lämmitetty seinä 250 mm:n syvyydessä.

RH+T 6



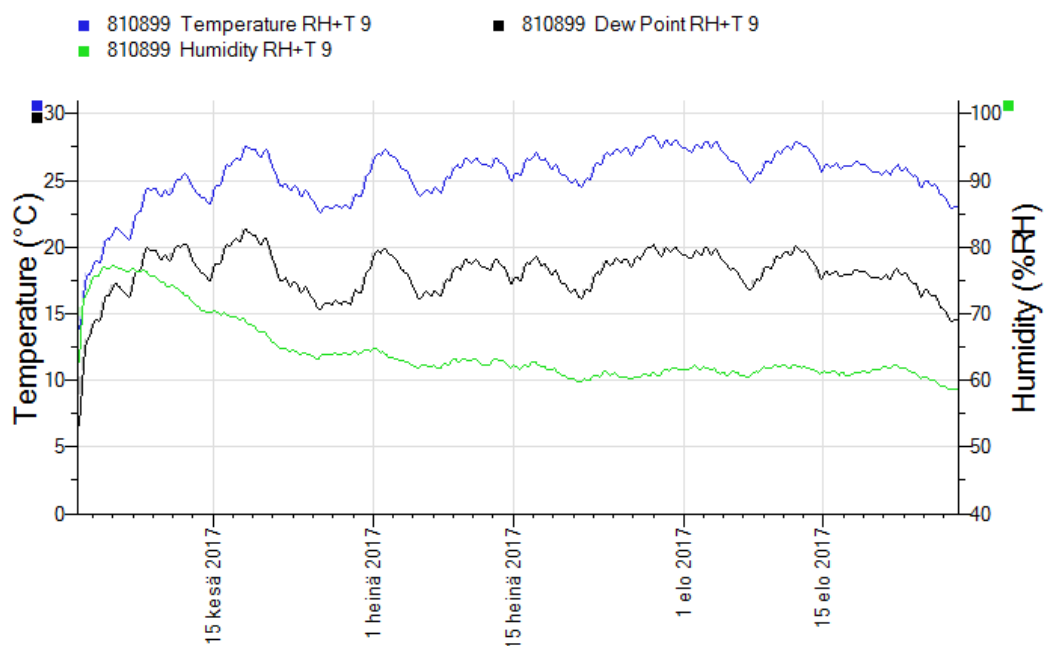
Kuva 71. Mittauspiste 6. Kalsiumsilikaattilevyillä peitetty seinä 140 mm:n syvyydessä.

RH+T 7



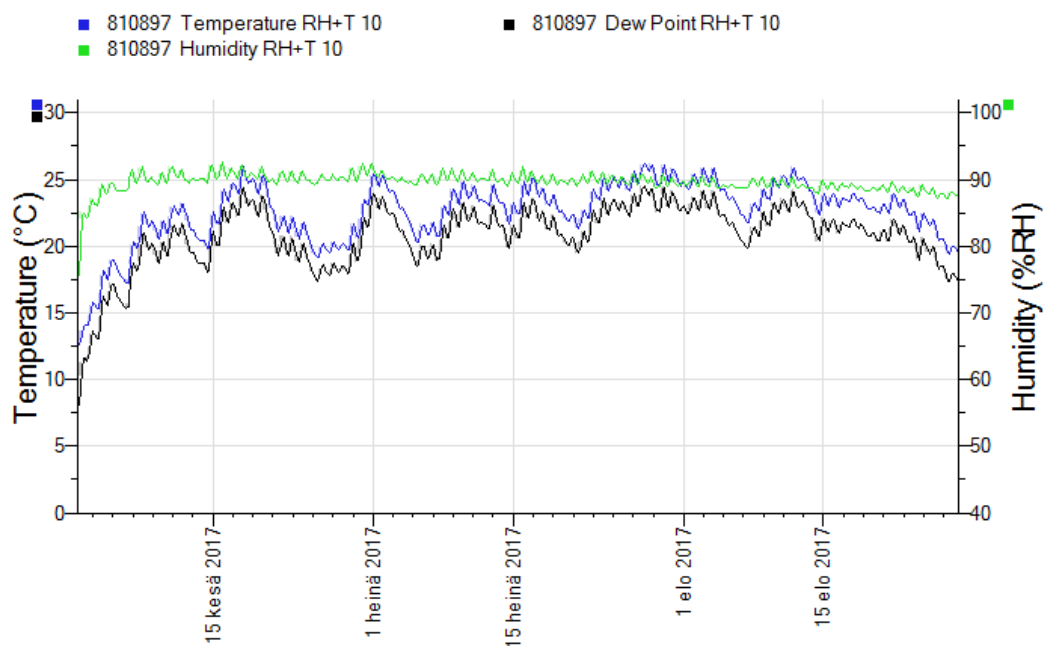
Kuva 72. Mittauspiste 7. Kalsiumsilikaattilevyillä peitetty seinä 290 mm:n syvyydessä.

RH+T 9



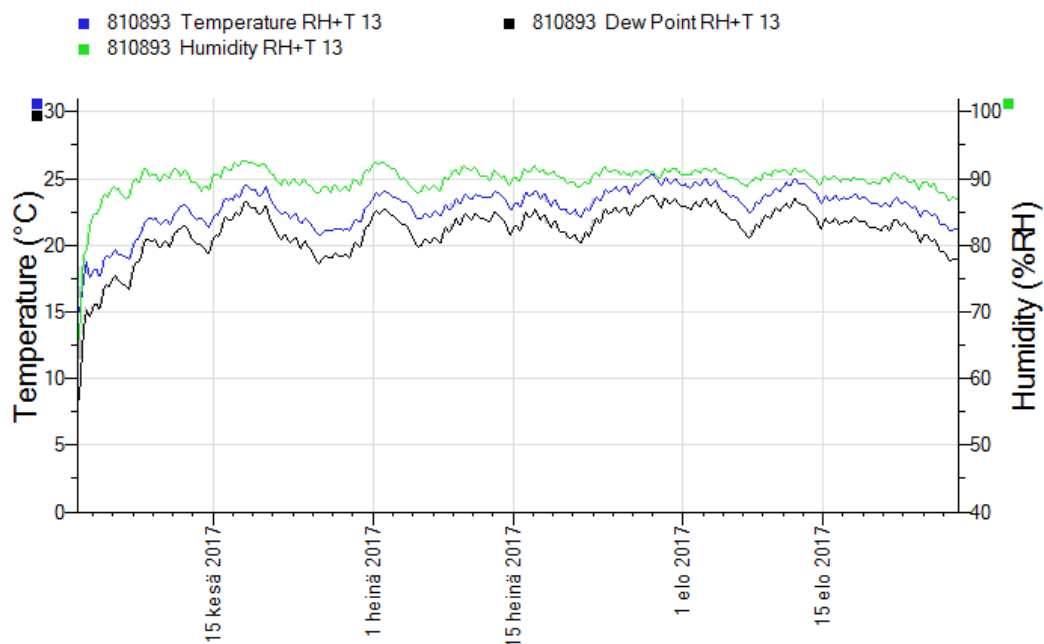
Kuva 73. Mittauspiste 9. Kalsiumsilikaattilevyillä peitetty ja kaapeleilla lämmitetty seinä 140 mm:n syvyydessä.

RH+T 10



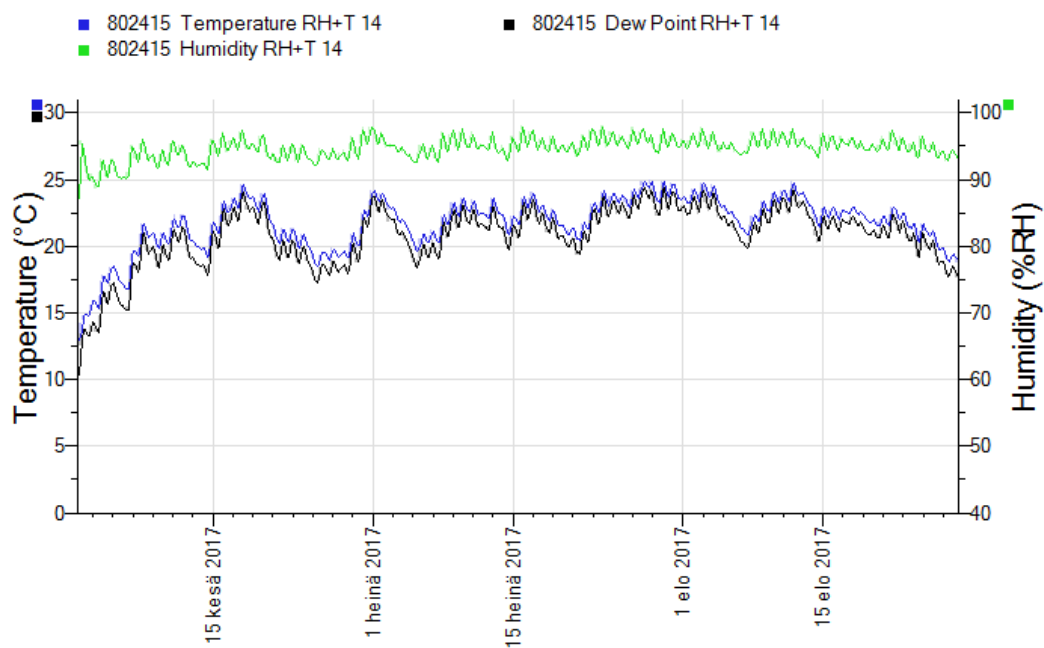
Kuva 74. Mittauspiste 10. Kalsiumsilikaattilevyillä peitetty ja kaapeleilla lämmitetty seinä 290 mm:n syvyydessä.

RH+T 13



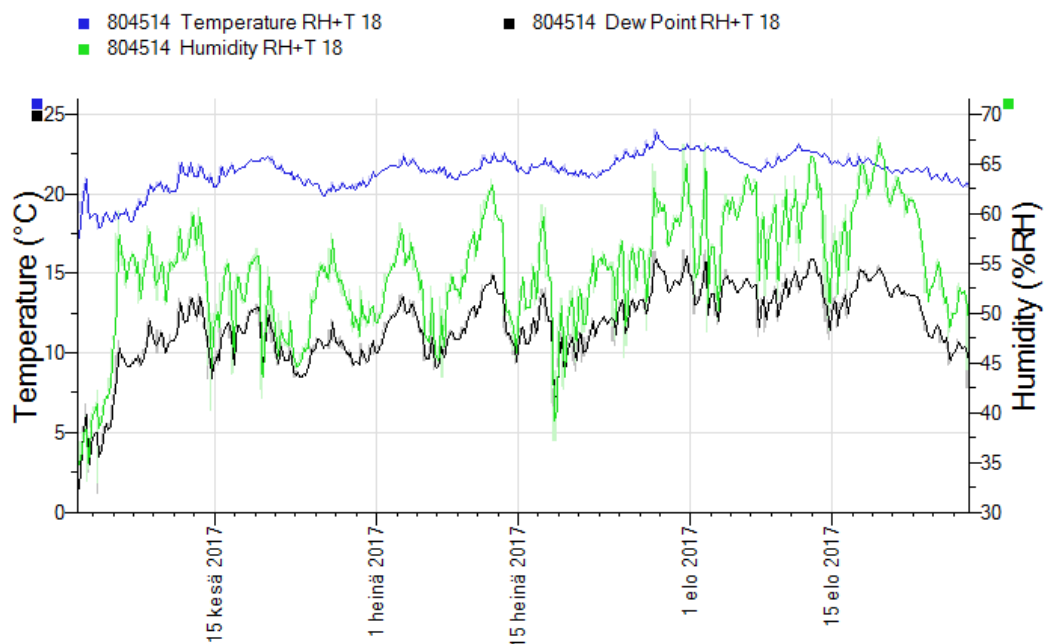
Kuva 75. Mittauspiste 13. Kaapeleilla lämmitetty seinä 140 mm:n syvyydessä.

RH+T 14



Kuva 76. Mittauspiste 14. Kaapeleilla lämmitetty seinä 290 mm:n syvyydessä.

RH+T sisäilma



Kuva 77. Sisäilman lämpö- ja kosteusolosuhteet mittauksen ajanjaksolta. Koska tila on käytössä vain kesäaikana, näkyy kuvaajan alussa tilan käyttöönoton ja lopussa käytöstä poistamisen vaikutukset sisäilman kosteusjakaumaan.